

SEDIMENTTRANSPORT EN SEDIMENTATIEPROCESSEN

IN DE SCHELDE TUSSEN ZANDVLIET EN GENT

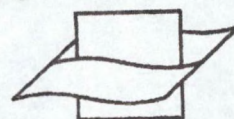
Stanislas WARTEL en Frederic FRANCKEN

249508



Koninklijk Belgisch Instituut voor Natuurwetenschappen

Beheer van het Mariene Ecosysteem, Sedimentologie,
Vautierstaat 29, 1000 Brussels, Belgium.



Vlaams Instituut voor de Zee
Flanders Marine Institute

VOORWOORD

Dit rapport bevat een synthese van de studie: "*Sedimenttransport en Sedimentatieprocessen in de Schelde tussen Zandvliet en Gent*". Deze studie werd uitgevoerd in opdracht van het **Ministerie van het Vlaams Gewest, departement Leefmilieu en Infrastructuur** tijdens de periode oktober 1996 – oktober 1999.

Aan deze studie werkten mee:

Patrick SCHOTTE, organisatie veldwerk en opstellen van database
Margaret CHEN, onderzoek van stabiele isotopen en sedimentanalyses
Cristina SALINAS, wiskundige verwerking van korrelgrootteanalyses
Jaap KALF*, fotografie en statistische verwerking van vlokstructuren
Alfons DRUYTS, administratieve assistentie en informatisie
Jan TAVERNIERS, technische realisatie van het terreinwerk
Annick LAUS, laboratoriumwerk

*Nederlands Instituut voor het Onderzoek der Zee, Texel, Nederland

DANKWOORD

Voor alles danken de auteurs **Professor Dr. Patrick MEIRE**, Instituut voor Natuurbeschoud en sinds 1999 professor aan de Universitaire Instellingen Antwerpen, die dit onderzoek heeft mogelijk gemaakt en heeft gesteund.

De auteurs bedanken ook zeer speciaal **Professor Dr. Pierre VANDENWINKEL**, Vrije Universiteit Brussel, Dienst Cyclotron, voor zijn daadwerkelijke medewerking bij het isotopen onderzoek en **Professor Dr. Doeke EISMA**, Nederlands Instituut voor het Onderzoek der Zee, Texel, Nederland, voor zijn medewerking bij de studie van de vlokstructuren met de BENTHOS CAMERA

Speciale dank gaat ook uit naar **Brandweercommandant Guido Derijcke**, brandweerkorps Geraardsbergen voor zijn medewerking bij het verzamelen van suspensiesedimenten op de Dender rivier.

Tenslotte worden de vele personen die hun medewerking verleenden oprecht bedankt in het bijzonder de **Beheerseenheid Mathematisch Model Noordzee en Scheldeestuarium** voor het ter beschikking stellen van het onderzoeksschip "BELGICA", alsook de **Commandanten** en de **bemanningen** van de onderzoekschepen "BELGICA", "VEREMANS" en "SCALDIS 1".

SEDIMENT TRANSPORT AND SEDIMENTATION PROCESSES IN THE SCHELDE BETWEEN ANTWERPEN AND GENT

Stanislas WARTEL en Frederic FRANCKEN

Royal Belgian Institute of Natural Sciences, Managment of the Marine Ecosystem, Sedimentology,
Vautierstaat 29, 1000 Brussels, Belgium.

ABSTRACT

This report describes sediment transport and sedimentation processes in the 160 km long estuary of the Schelde river. In a first approach the *energy distribution* in the estuary was calculated using the hydrographic data of 87 cross-sections provided by the hydrographic survey of Antwerpen. It appears (figures 1 and 2) that the energy maximum occurs between Antwerpen (80 km upstream of the river mouth) and the confluence of the rivers Rupel and Schelde (100 km upstream of the river mouth) which is far more landward than expected from the theory proposed by Dalrymple and Zaitling (1992). This reflects most probably the effect of human activities on the estuarine environment more specifically the effect of constriction of the river and deepening of the main channel. The tidal wave will intrude farther landinward in both cases.

The *shear velocity*, expressing the main erosion capacity, has been calculated based on 12 hour measurements of water velocity at 0.2 m intervals over the whole water column. The average shear velocity plotted against the distance to the mouth (figure 3) shows a pattern that is very similar to the energy distribution. A minimum shear velocity occurs between Zandvliet (60 km upstream of the river mouth) and Antwerpen, a maximum one occurs around 90 km upstream from the rivermouth near Vlissingen.

The *sediment mass transport* along the estuary follows the pattern of the energy distribution (figures 4 and 5). Significant differences in mass transport, however, exist between the left and right banks of the river as is illustrated by measurements at the Oosterweel station (figures 6 and 7). It was also shown that mass transport is much higher during autumn than during the period of spring. A relationship between sediment mass transport and river discharge could not be observed.

Suspended sediments were collected from 3 stations at the *tidal flats* of Appels, Tielrode and Groot Buitenschoor using a siphon sampler that was emptied every fortnight. The results from Apples and Tielrode show a fluctuation in sediment composition (figure 8) with higher clay concentrations during the periods March-May (spring) and September-November (autumn). This evolution appears to be the opposite of river discharge (figure 9): high clay contents occur during periods of low river discharge. Nevertheless, the organic matter concentration follows more or less the trend of river discharge (figure 10).

There are 240 *suspended samples from the main river channel* that were also analysed. The average mean grain size is around 1 to 2 micron and the average clay content varies between 44 and 56 % (tabel 2). These averages show small fluctuations from one year to another. It could also be shown that from 1996 to 1998 a relative decrease in average clay content occurred which was caused by an import of silt (mainly coarse silt).

Analyses of the grain-size data, using the multivariate extension of the entropy analysis, showed that the suspended sediments could be grouped into 8 groups (figure 11). 5 groups were omni-present, whereas 3 groups occurred more or less locally. One group occurred in the most seaward part of the estuary and consisted for more than 40 % of fine sand (group "dz", figure 12). The sand fraction decreased landward being below 20 % upward of Zandvliet. A second group (group "d", figure 13) showed a very high clay content (> 70%). This group was observed near the confluence of the Rupel and Schelde Rivers, approximately 100 km upward from the river mouth at Vlissingen. This high clay content can be explained by the erosion of the Oligocene Boom Clay layer (Rupelian). A third sediment group (group "g", figure 14) showed a high silt content and was observed occasionally near Zandvliet. During the sampling time intensive dredging of the main channel was going on in this area. This is why it is assumed that resuspension of bottom sediments as a result of the dredging activity causes the high silt content in suspension.

The *exchange of sediment between the river channel and the marshes* was studied in the area of Tielrode. In July and October 1997 and in January and April 1998 12-hour measurements were performed in a major creek giving access to the marsh, and simultaneously in the main river channel in front of the creek. Suspended sediments were sampled fortnightly from July 97 to July 98 using 2 siphon samplers: one positioned in a subsidiary creek near the mouth the other on the tidal flat near the entrance of the major creek. Grain-size analyses showed that the sediment properties were very similar for both sampling points. At both localities the clay content decreased from 75 % to 55 % during the sampling period. During the same period a similar decrease in clay content was observed at the Appels sampling station. This decrease is not correlatable to river discharge nor to changes in tidal amplitude.

Combining the measurement of the current velocity and the suspended sediment concentration the *sediment transport through the marsh channel* was calculated (figure 19). These measurements showed a net supply of sediments to the marsh. An average of 60 g dry sediment is deposited per square meter at each spring tide.

Besides the concentration and the grain-size of the suspended sediments, the floc texture was also measured using the Benthos camera (figure 2, Eisma et al., 1990). The results indicate that the sediments are flocculated (figure 21) not only in the brackish part of the estuary but also in the fresh water part. Floc sizes tend to increase from an average of 60 μm downstream of Antwerpen to 90 μm upstream (figure 22). This indicates that other processes may probably as important as, or even more important than, the effect of salinity.

Using the ^{210}Pb isotope as a tracer it could be shown the relative amount of resuspended sediments increased that from 1990 to 1998. The maximum observed activity of ^{210}Pb in the suspended sediment decreased during this period (figure 30). Since there is no indication for a change in the supply of ^{210}Pb one may conclude that

the resuspension of older sediments became more important. The fact that large amounts of mud were dredged in the main channel may explain the increased resuspension.

An alternative argument for the resuspension resulting from dredging is shown in the increased amount of the silt fraction in the suspended sediments (figure 33). This is in good agreement with the observed silt content during dredging time in the area of Zandvliet (grain size group "g", figure 14).

Finally the *sediment accumulation* on the tidal flats and in the marshes has been calculated using ^{210}Pb activity. The average accumulation rate is 6 mm.yr^{-1} (tabel 11) which is higher than the average increase in seal level (1 mm.yr^{-1}). The accumulation rate decreases from Zandvliet landward (figures 34 and 35).

On the marshes an accumulation rate of 45 g.m^{-2} per springtide has been calculated. This value matches very well with the sedimentation rate of 60 g.m^{-2} calculated from the sediment transport measurements.

Sedimenttransport en sedimentatieprocessen in de Schelde tussen Zandvliet en Gent

Stanislas WARTEL en Frederic FRANCKEN

Koninklijk Belgisch Instituut voor Natuurwetenschappen, Beheer van het Mariene Ecosysteem, Sedimentologie,
Vautierstraat 29, B-1000 Brussel.

Inleiding

Deze tekst is een synthese van het eindrapport AMIS DS6.1, het werk uitgevoerd door de groep Sedimentologie in het kader van het OMES onderzoeksproject. De verschillende aspecten (*waterkolom, gesuspendeerd materiaal, slikken, schorren, ...*) die het sedimentologisch onderzoek omhelsden worden behandeld in afzonderlijke hoofdstukken die samen een globaal overzicht geven van de sediment karakteristieken in het bestudeerde gebied.

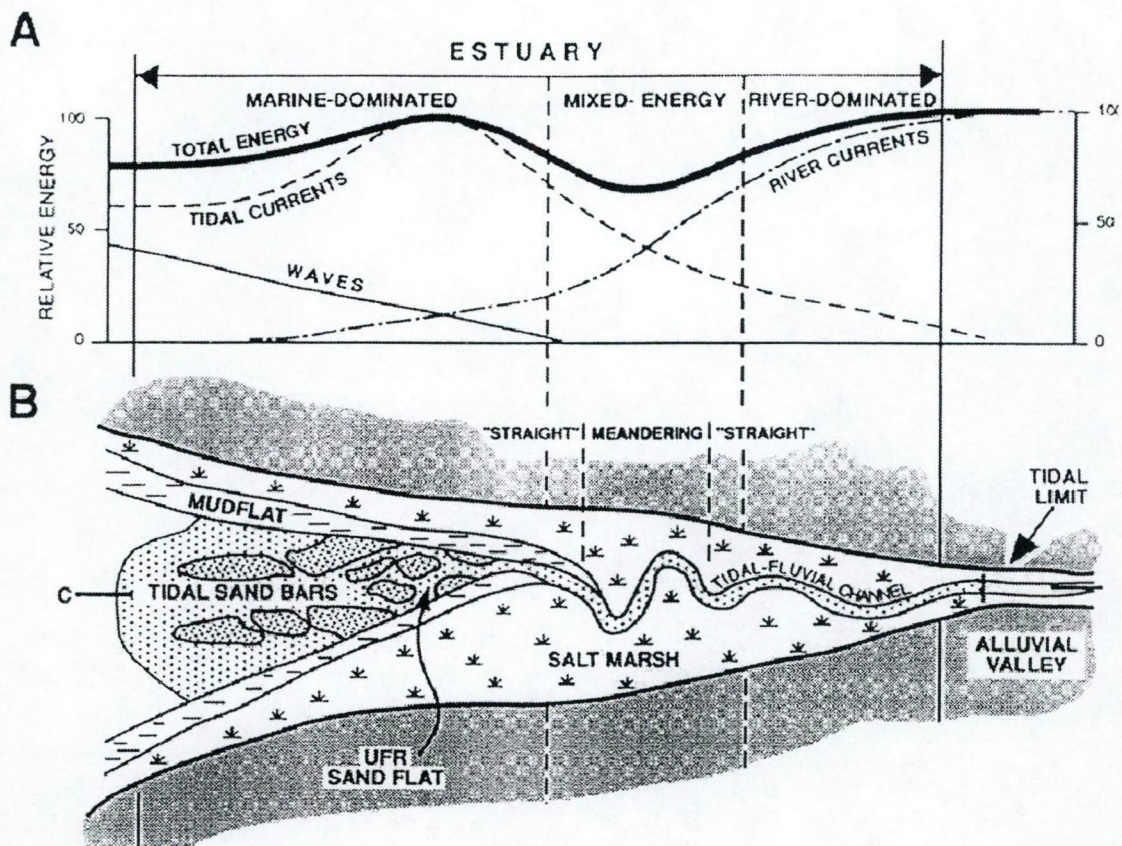
Het onderzoek beoogde de bepaling van de verschillende sedimenttypes en de beschrijving van hun karakteristieken en onderlinge verbanden met het oog op de evaluatie van het gedrag en de dynamiek van de sedimenten in functie van de hydrodynamica van het milieu en van hun relatie met biologische en geochemische factoren. De bijdragen van de verschillende brongebieden (bovenloop, zee en estuarium) in de verschillende sedimenttypes werd geëvalueerd, evenals het seizoenaal gedrag van het sediment en de accumulatiesnelheid van sedimenten op de slikken en de schorren.

Energieverdeling in het Schelde-estuarium

Het Schelde-estuarium, het gedeelte van het Scheldebekken dat onderhevig is aan de getijdewerking, strekt zich uit over een lengte van ongeveer 160 km van Gent (België) tot in Vlissingen (Nederland). Op de zijrivieren van de Schelde, de Durme, de Rupel, de Zenne, de Dijle en de Nete, is deze getijdewerking nog waarneembaar. Het gedrag en de grootte van het sedimenttransport in het Schelde-estuarium wordt beïnvloed door een samenspel van mariene processen, golven en getijden, en fluviatiele processen. De eerste nemen meestal af in intensiteit wanneer men het estuarium opgaat, terwijl de laatste in sterkte afnemen in zeewaartse zin (Dalrymple *et al.*, 1992). In principe leidt dit systeem tot een opsplitsing van het estuarium in 3 zones: een zeewaartse zone waar het netto massatransport landinwaarts is gericht, een middelste zone waar een netto convergentie van suspensiemateriaal optreedt - ook wel als troebelheidsmaximum aangeduid - en een derde zone, stroomopwaarts gelegen, waar door fluviatiele processen materiaal richting zee wordt gevoerd (fig. 1).

Het Schelde-estuarium, welke onder de gemengde-energie estuaria gerekend kan worden (Dalrymple *et al.*, 1992), zou in een geïdealiseerde situatie aan de classificatie van Dalrymple moeten voldoen. Om deze theorie te toetsen werd de heersende energie berekend. Het Schelde-estuarium is echter complexer dan het estuarium dat door Dalrymple besproken wordt, niet alleen omdat het stroomopwaarts vertakt is, maar vooral omdat de schorren ten gevolge van indijking en haven ontwikkeling bijna overal

sterk gereduceerd zijn of zelfs ontbreken. Dit heeft een rechtstreeks effect op het tijvolume en de natte sectie bij hoog water, een onrechtstreeks gevolg op de natte sectie bij laag water en tenslotte, globaal bekeken, zal de totale energie gewijzigd worden.



Figuur 1: Distributie van energie (A) en morfologische elementen (B) in een geïdealiseerd tij-gedomineerd estuarium. (naar Dalrymple et al., 1992, UFR = upper flow regime). -Distribution of energy (A) and morpho-units (B) in an ideal tide-dominated estuary (after Dalrymple et al., 1992, UFR = upper flow regime).

Mathematische benadering

De totale energie in het estuarium kan geschreven worden als de som van de energie van de rivier en de energie van het tij:

$$E_{est} = E_{riv} + E_{tij}$$

Rekening houdend met het feit dat energie bestaat uit een potentiële en een kinetische deelterm ($E_{tot} = E_{kin} + E_{pot}$) kan de vorige vergelijking verder uitgeschreven worden als:

$$E_{est} = E_{kin}^{riv} + E_{pot}^{riv} + E_{kin}^{tij} + E_{pot}^{tij}$$

De kinetische energie wordt samengesteld door de beweging van een massa:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

terwijl de potentiële energie de energie is die een massa op een bepaalde hoogte bezit:

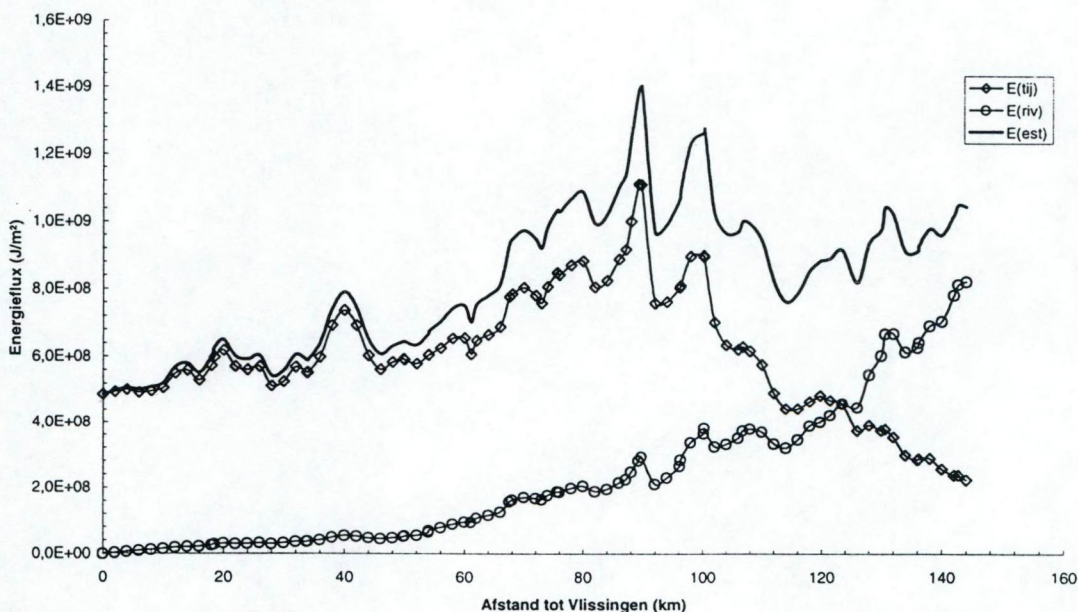
$$E_{pot} = m \cdot g \cdot h$$

Totale energie

Om de totale energie te kunnen berekenen dienen de absolute energiewaarden herleid te worden ten opzichte van de gemiddelde natte sectie waar de energie door stroomt:

$$E_{est} = \frac{E_{kin}^{riv}}{GNS} + \frac{E_{pot}^{riv}}{GNS} + \frac{E_{kin}^{tij}}{GNS} + \frac{E_{pot}^{tij}}{GNS}$$

Zo bekomt men een relatieve totale energie, met GNS als gemiddelde natte sectie. De totale energie toont aan dat het estuarium naar een tij-gedomineerd estuarium leunt, daar de tij-energie aanzienlijk belangrijker is dan de fluviatiele-energie.



Figuur 2: distributie van de energie over het estuarium. De totale energie (zwarte lijn) is de som van de tij-energie (ruitjes) en de fluviatiele-energie (bolletjes). – Energy distribution along the estuary. The total energy (full line) is the sum of the tidal energy (diamonds) and the fluvial energy (circles).

Vergelijken we de theorie zoals die geformuleerd werd door Dalrymple (fig. 1) met de berekende energie (fig. 2) dan zien we dat het verloop van beide gelijk is. Wat opvalt is dat in het geval van het Schelde-estuarium de zone van gemengde energie sterk landinwaarts is opgeschoven. De tij-energie neemt minder sterk af dan door de theorie van Dalrymple zou verwacht worden en kan zich bijgevolg verder landinwaarts voortplanten. Een mogelijke verklaring hiervoor zijn de dijken die langsheen het estuarium opgetrokken zijn en zo de rivier in bedwang houden. Doordat de rivier geen energie kan dissiperen door overstroming van schorregebieden, zal de tij-energie langer

behouden worden en verder landinwaarts doordringen. Deze landinwaartse verschuiving van de energie wordt nog verder versterkt door het uitdiepen van de hoofdgeul. Additioneel wordt het effect nog vergroot door het rechtrekken van de rivier op plaatsen waar er vroeger meanders te vinden waren (Overmere – Kalken).

Sedimentatieprocessen

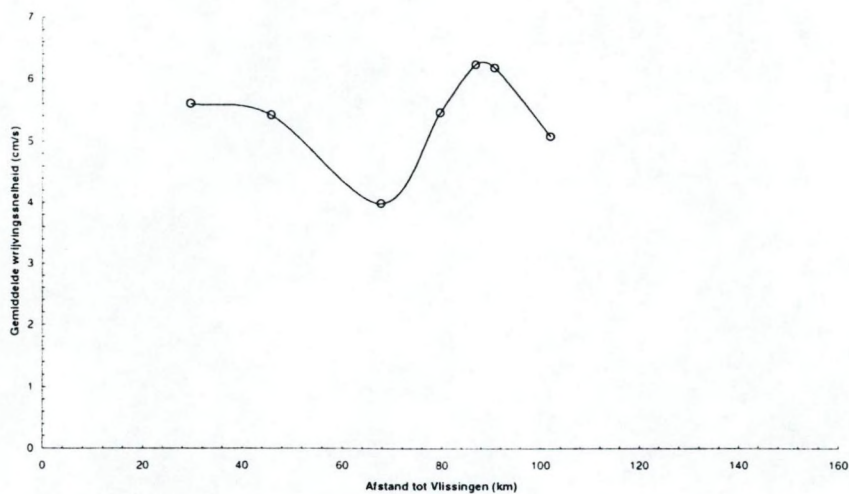
Wrijvingssnelheid

Uit talrijke terreinwaarnemingen (Van Veen, 1936; Sternberg, 1968) evenals uit laboratoriumexperimenten (Keulegan, 1938; Vanoni, 1946 en 1952), is gebleken dat de stroomsnelheidsverdeling, volgens een verticale in een rivier, beantwoordt aan een algemene vergelijking van de vorm (Inman, 1963):

$$\frac{U}{U_*} = \frac{U_m}{U_*} + \frac{2.3}{k_0} \log_{10} \frac{z}{h}$$

Waarin U de stroomsnelheid is op een gegeven diepte (cm.s^{-1}), U_* de wrijvingssnelheid tegen de bodem (cm.s^{-1}), U_m de maximale stroomsnelheid op een verticale, k_0 de von Kármán constante, z de gegeven diepte onder het wateroppervlak en h de waterdiepte op ogenblik van de meting.

Deze vergelijking is bekend als de 'von Kármán – Prandtl' vergelijking. Ze dient als uitgangspunt voor talrijke mathematische studies van het sedimenttransport in water. Er wordt hier namelijk rekening gehouden met de wrijvingssnelheid tegen de bodem (U_*), welke een bepalende factor is voor de grootte van het sedimenttransport en afgeleid wordt uit de stroomsnelheidsvergelijking. Wordt de stroomsnelheid (U) uitgezet tegen het logaritme van z/h , dan moet, wanneer aan de von Kármán – Prandtl vergelijking voldaan is, de stroomsnelheidsverdeling volgens een rechte verlopen. De helling van deze rechte is proportioneel met U_* . De meetprocedure brengt echter een aantal beperkingen met zich mee (tijdsverschil tussen de metingen aan het oppervlak en de metingen tegen de bodem, bewegingen van het meetschip, ...) die ertoe leiden dat de meetfout tot 10 % kan bedragen.



Figuur 3: De gemiddelde wrijvingsnelheid voor 7 meetstations verspreid over het Schelde-estuarium. De meetwaarden zijn uitgemiddeld over het gehele tij. – Average shear velocity for 7 measuring stations along the Schelde estuary.

De berekeningen zijn gebaseerd op 12-uurs metingen van stroomsnelheidsprofielen op stations verspreid tussen ca. 30 en 100 km afstand tot Vlissingen (Ossensisse, het Zuidergat, Zandvliet, De Parel, Oosterweel, De Vlake en de Rupelmonding). De waarden die op deze wijze bekomen werden, zijn uitgemiddeld over het gehele tij en vertonen een patroon dat vergelijkbaar is met dat van de energieverdeling over het estuarium (fig. 3). Op de stations te Ossensisse en de Zuidervlakte is de wrijvingsnelheid ongeveer 5.5 cm.s^{-1} . Het minimum (4 cm.s^{-1}) vinden we in Zandvliet, terwijl het maximum te situeren valt in het gebied tussen Antwerpen en de Rupelmonding. Algemeen kan me stellen dat de hier berekende waarden vroegere metingen uitgevoerd in het Schelde estuarium (Wartel, 1972) bevestigen. Daar de wrijvingsnelheid een bepalende factor is voor de mate waarin sediment geresuspendeerd zal worden, kunnen we voor de regio Rupel tot Antwerpen en vanaf de Belgisch-Nederlandse grens een verhoogd massatransport verwachten.

Massatransport

In combinatie met gelijktijdig opgemeten gehalten aan gesuspendeerd materiaal kunnen de stroomsnelheidsprofielen informatie leveren over het massatransport. Het transport kan hieruit berekend worden volgens (Pejrup, 1988; De Haas & Eisma, 1992):

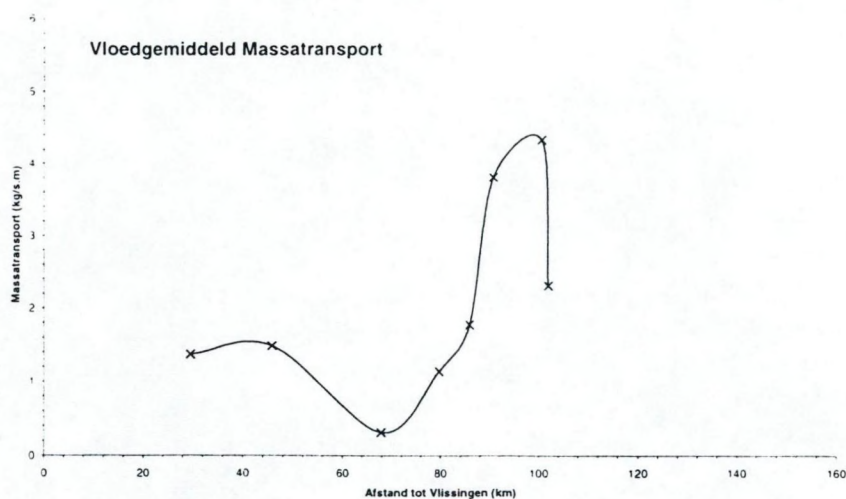
$$\text{Transport} = \int \int v_{tz} \cdot c_{tz}$$

v = stroomsnelheid

c = concentratie gesuspendeerd sediment

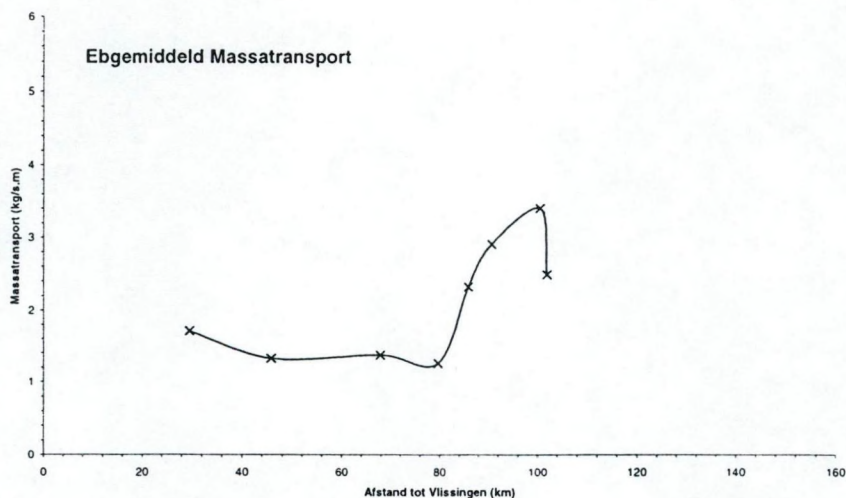
t = tijd

z = diepte



Figuur 4: vloedgemiddeld massatransport langsheen het Schelde estuarium (afstanden in km tot Vlissingen).
 – Average mass transport during flood along the Schelde estuary (distances in km from Vlissingen).

We gaan hier van een rechtlijnig verband uit, terwijl het in realiteit een zeer complexe interactie is.

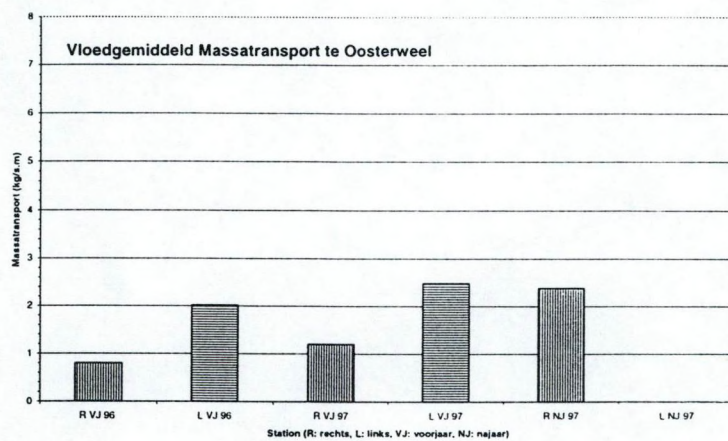


Figuur 5: ebgemiddeld massatransport langsheen het Schelde estuarium (afstanden in km tot Vlissingen).
 – Average mass transport during ebb along the Schelde estuary (distances in km from Vlissingen).

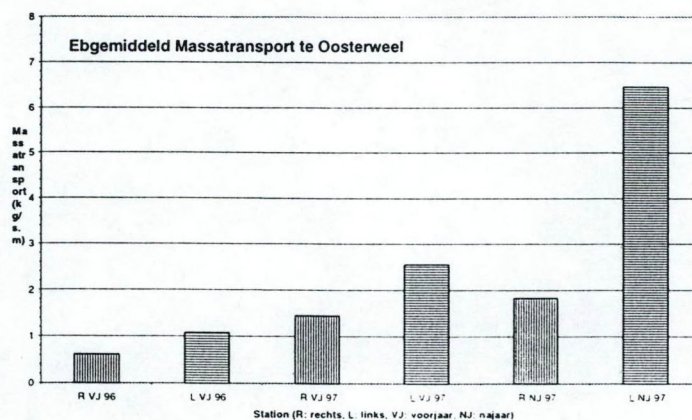
De grafieken (fig. 4 en 5) tonen de gemiddelden per dwarsraai zowel in plaats (links-rechts) als in tijd. Zoals bij de energieverdeling en de wrijvingssnelheid, vertoont ook het massatransport een goede overeenstemming met Dalrymple's theorie. Het maximum massatransport per meter dwarssectie blijkt zich voor te doen in het gebied tussen Antwerpen en de monding van de Rupel (80 – 100 km van Vlissingen). Dit is in overeenkomst met wat de wrijvingssnelheid deed vermoeden: de hoogste waarde van deze parameter is ook in dit gebied te vinden (hier niet getoond). Het maximum massatransport werd opgemeten aan De Vlakte, nl. $8.3 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. Tussen Oosterweel en De Parel is er een daling waarneembaar, waarna een kleine stijging op te merken valt vanaf de grens richting Ossenisse.

Station	Voorjaar 1996		Voorjaar 1997		Najaar 1997	
	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts	Links
Maximum	1.5	5.6	2.4	5.7	4.2	10.4
Gemiddeld	0.7	1.6	1.3	2.5	2.1	6.5
Vloedgem.	0.8	2.0	1.2	2.5	2.4	N.B.
Ebgem.	0.6	1.1	1.4	2.5	1.8	6.5
Bovendebiet	21.1		26.8		24	

Tabel 1: massa transport te Oosterweel ($\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-1}$) en bovendebiet ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) voor het voorjaar van 1996 en 1997 en voor het najaar van 1997. – Mass transport at Oosterweel ($\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-1}$) and river discharge at Schelle ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) during spring season in 1996 and 1997 and during autumn season in 1997.



Figuur 6: gemiddeld massatransport tijdens vloed te Oosterweel. R: rechts van de vaargeul, L: links van de vaargeul. VJ: voorjaar, NJ: najaar. – Average mass transport during flood at Oosterweel. R: right side of navigation channel, L: left side of navigation channel, VJ: during spring season, NJ: during autumn season.



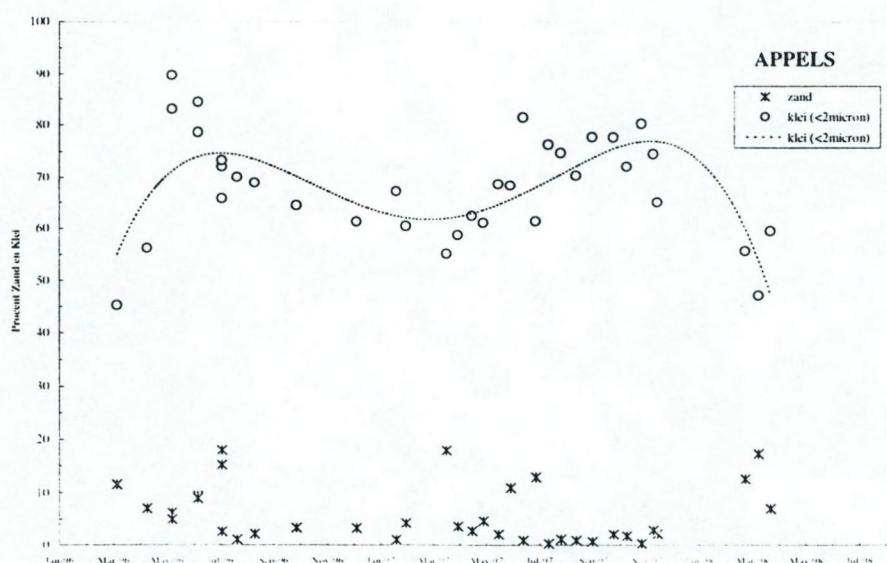
Figuur 7: gemiddeld massatransport tijdens eb te Oosterweel. R: rechts, L: links. VJ: voorjaar, NJ: najaar. – Average mass transport during ebb at Oosterweel. R: right side of navigation channel, L: left side of navigation channel, VJ: during spring season, NJ: during autumn season.

Bij een aantal dwarsraaien is aangetoond dat het massatransport significant verschillend is aan de linker- en rechterkant van de vaargeul. Als voorbeeld wordt hier Oosterweel (fig. 6 en 7) naar voor gehaald, waar het massatransport aan de linkeroever beduidend hoger is dan aan de rechteroever. Ook seizoensgebonden variaties zijn waarneembaar. De verschillen tussen voor- en najaar zijn opmerkelijk: zowel voor het maximum als de gemiddelde waarden (zie ook tabel 1) is een verdubbeling van het transport in het najaar van 1997 ten opzichte van het voorjaar (zowel 1997 als 1996) waarneembaar, terwijl het bovendebiet vergelijkbaar is (ca. $24 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, Taverniers 1996). Er zijn duidelijk gebieden met sterk van elkaar verschillende stroomsnelheden en massatransport hoeveelheden.

De gesuspendeerde sedimenten

Metingen te Appels

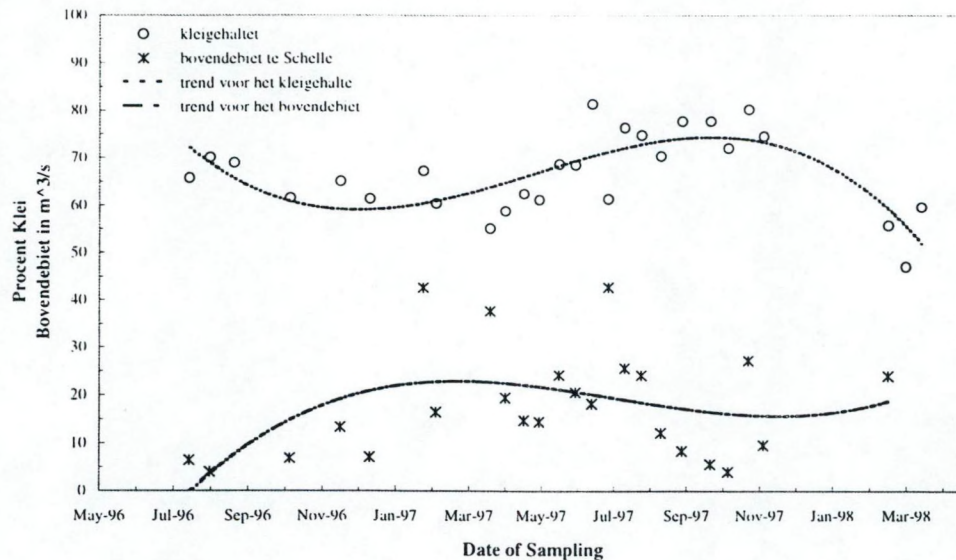
De sedimenten, verzameld met behulp van de sifonsampler, weerspiegelen een gemiddelde korrelgroottesamenstelling van het suspensiesediment. De sifonsamplers werden in principe om de veertien dagen vervangen. Het sediment dat tijdens deze veertien dagen voorbij stroomde werd cumulatief bemonsterd, wat wil zeggen dat tijdens ieder hoog water sediment aan het bestaande staal werd toegevoegd. De resultaten van de analyses geven dus een gemiddeld beeld van het gesuspendeerd sediment over een tijdspanne van 14 dagen.



Figuur 8: zand- en kleigehalte van suspensie sedimenten te Appels. – Sand- and clay content of suspended sediments at Appels

De sifonsampler te Appels heeft het langst gewerkt (maart 1996- april 1998) en geeft dan ook het meest volledige beeld. In figuur 8 is het verloop in de tijd weergegeven van

het gehalte aan zand en aan klei in het gesuspendeerd sediment. Het kleigehalte vertoont een grotere variatie in de tijd dan het zandgehalte. Het kleigehalte varieert van ongeveer 50 à 60 % in de periode november - april tot 70 à 80 % tijdens de periode mei - november. De zandgehalten blijven meestal onder de 5 %. In enkele gevallen kwam het zandgehalte tussen de 10 à 20 % te liggen.



Figuur 9 : trend van de tiendaagse gemiddelden van het bovendebiet te Schelle en het kleigehalte in het suspensiesediment te Appels. – Trend of river discharge (averaged over 10 day periods) compared to clay content of suspended sediments at Appels.

Een mogelijke verklaring voor de veranderingen in het kleigehalte kan gevonden worden in een verandering van het bovendebiet en de verschuiving van het fluvio-mariene evenwicht dat hiermee verbonden is. De trend van de 10-daagse gemiddelden (Taverniers, 1996) van het bovendebiet is weergegeven in figuur 9 (de uitzonderlijke hoge waarden van augustus 1996 is in dit geval bewust weggelaten omdat het geen invloed kan gehad hebben op het hier beschouwde proces). Tevens is de trend van het kleigehalte (14-daagse gemiddelde waarden) weergegeven.

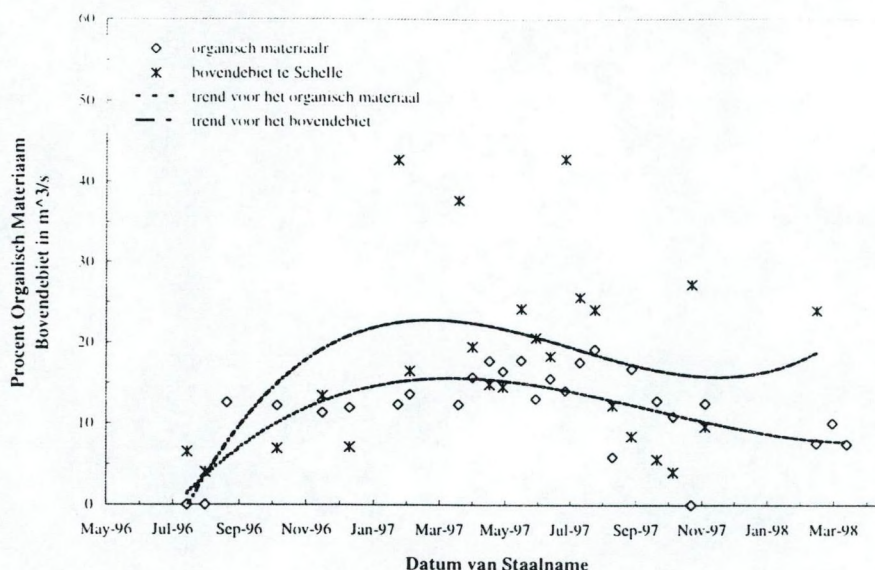
Beide curven vertonen een vrij opvallend tegengestelde trend: een toename van het bovendebiet gaat gepaard met een daling in het kleigehalte. Dit is toch vrij opvallend aangezien men in eerste instantie toch zou verwachten dat het fijnere sediment vooral uit de bovenloop aangevoerd wordt. Dit temeer daar de stuwen, die het tij ophouden, toch ook de grovere fracties, aangevoerd vanuit de bovenloop, zullen tegenhouden en zo de relatieve hoeveelheid fijn sediment dat stroomafwaarts vervoerd wordt zullen doen toenemen.

Organisch materiaal in het suspensiesediment te Appels

Ook de hoeveelheid organisch materiaal dat aangetroffen wordt in het suspensiesediment te Appels vertoont een fluctuatie. Tijdens de periode van maart tot

november was bijna een dubbele hoeveelheid organisch materiaal in het sediment aanwezig vergeleken met de rest van het jaar (fig. 10).

Anders dan het kleigehalte vertoont het organisch materiaal een trend die vrij parallel verloopt met de veranderingen in het bovendebiet te Schelle. Op basis hiervan kan de veronderstelling gemaakt worden dat het gesuspendeerde organisch materiaal vooral vanuit het rivierbekken aangevoerd wordt?



Figuur 10: organisch materiaal in het suspensiesediment te Appels.- *Organic matter in the suspended sediments at Appels.*

Korrelgrootte onderzoek van het gesuspendeerd sediment in de hoofgeul.

Tijdens de periode 1996 tot 1998 werden in de hoofgeul van de Schelde ongeveer 240 stalen genomen van het gesuspendeerd sediment. De plaatsen van staalname waren verspreid over het gehele estuarium van de Schelde, gaande van Vlissingen tot Gent. Het merendeel van de staalname echter gebeurde in de zones van Dendermonde-Appels tot Tielrode en van Antwerpen tot Zandvliet. In Appels, Tielrode en het Groot Buitenschoor waren sifon-samplers opgesteld die principieel om de veertien dagen een sedimentstaal opleverden.

Het is de bedoeling aan de hand van deze staalnames een aanvaardbaar overzicht te krijgen van de samenstelling van het gesuspendeerd sediment. Ook werd een poging ondernomen om regionale verschillen op te speuren.

Algemeen genomen is de korrelgrootteverdeling van het gesuspendeerd sediment redelijk gelijkmatig. Toch toont het onderzoek aan dat de gemiddelde samenstelling van jaar tot jaar kleine verschillen vertoont (tabel 2).

De mediaan van het gesuspendeerd sediment ligt tussen 1 en 2 μm . De gemiddelde spreiding, uitgedrukt in phi eenheden, bedraagt 4.3. Hieruit volgt dat 68 % van het gesuspendeerd sediment een korrelgrootte heeft tussen 38 en 0.1 μm .

Het kleigehalte bedraagt gemiddeld 44 % tot 56 %. De verhouding silt-klei is gemiddeld kleiner dan 1. Er is dus meer klei dan silt aanwezig in het Belgisch gedeelte van het Schelde estuarium.

Jaar	N	Mediaan μm	Sortering ϕ	Zand %	Silt %	Silt ratio	Klei %	Silt-klei ratio
1996	52	1.15	4.27	8	43	0.64	49	0.88
1997	58	0.86	4.28	7	38	1.01	56	0.68
1998	42	1.79	4.30	14	42	0.89	44	0.95

Tabel 2: gemiddelde korrelgrootteparameters van het suspensiesediment voor 1996 tot 1998 (N is het aantal waarnemingen). - *Average grain-size parameters of suspended sediments for 1996 to 1998 (N is the number of observations).*

Een opvallend verschijnsel, dat uit tabel 2 kan afgeleid worden, is dat het zandgehalte in 1998 ongeveer tweemaal hoger was dan de vorige jaren. Gelijklopend hiermee kan men ook opmerken dat de silt-klei ratio in 1998 dichter bij de eenheid komt. Dit laatste betekent dat er in 1998 aanzienlijk meer silt dan klei in suspensie voorkwam. De evolutie van de silt ratio wijst er verder op dat de toename aan silt voornamelijk in de grovere silt fractie plaats vindt.

Datum	Bovendebiet ($m^3.s^{-1}$)	tijverschil (m)
16/4/96	10	
2/5/96	12	5.5
28/5/96	40	4.9
30/10/96	26	6.4

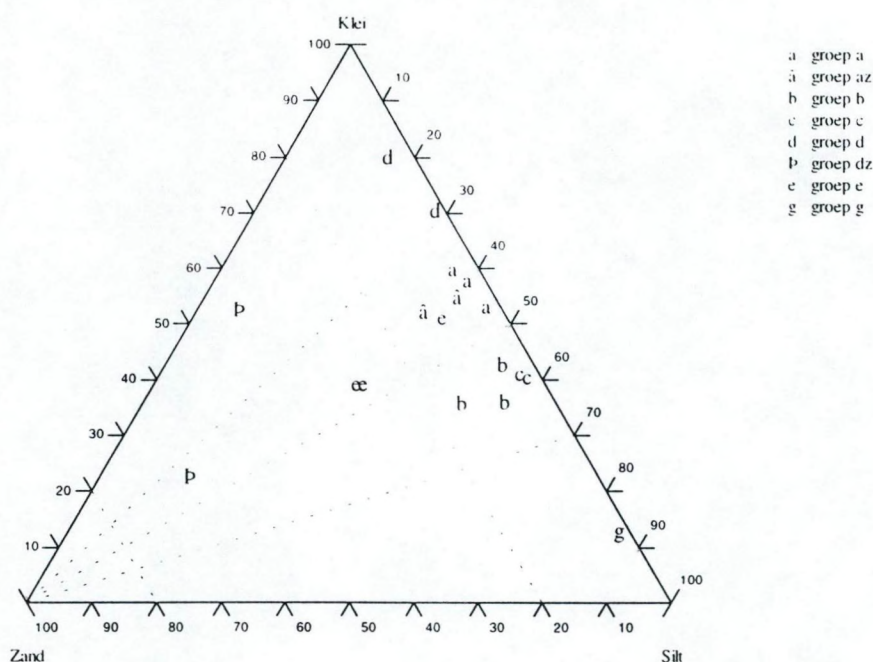
Tabel 3: bovendebiet en tijverschil tijdens de suspensietaalname in 1996. - *River discharge and tidal range for the suspended sediment sampling periods in 1996.*

Uit de staalnames verricht in 1996 blijkt dat het kleigehalte een grote spreiding vertoont en dat de afstand tot de monding geen rol speelt (met dien verstande dat voor de Westerschelde slechts een beperkt aantal stalen beschikbaar was). Wordt het kleigehalte echter uitgezet in functie van de tijd dan blijkt datvoor de periode april tot november 1996 het gemiddeld kleigehalte afneemt.

Of er een verband bestaat tussen deze veranderingen en het bovendebiet of het tijverschil (tabel 3) is niet erg duidelijk. De lage kleigehaltes van november 96 kwamen wel voor in een periode met een groter tijverschil dan in april en mei. Dit dalend kleigehalte gaat gepaard met een duidelijke toename van de silt-klei ratio wat er op wijst dat de afname aan klei allezins voor een deel kan toegeschreven worden aan een hoger siltgehalte.

Om het relatief groot aantal sedimentanalyses onderling te kunnen vergelijken werd gebruik gemaakt van een multivariaat uitbreiding van de entropy analyse (Forrest & Clark, 1989). Deze methode heeft het voordeel dat het volledige korrelgroottespectrum

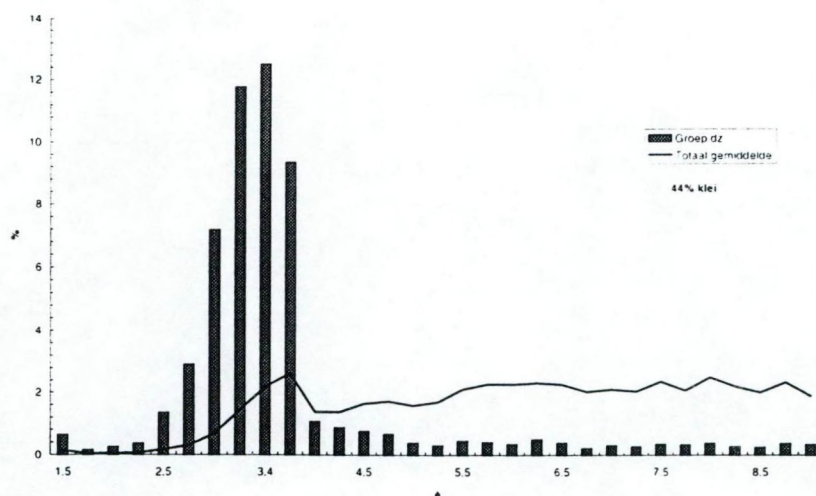
in beschouwing genomen wordt in plaats van slechts een beperkt aantal statistische parameters. Deze werkwijze leverde een groepering op in 8 groepen.



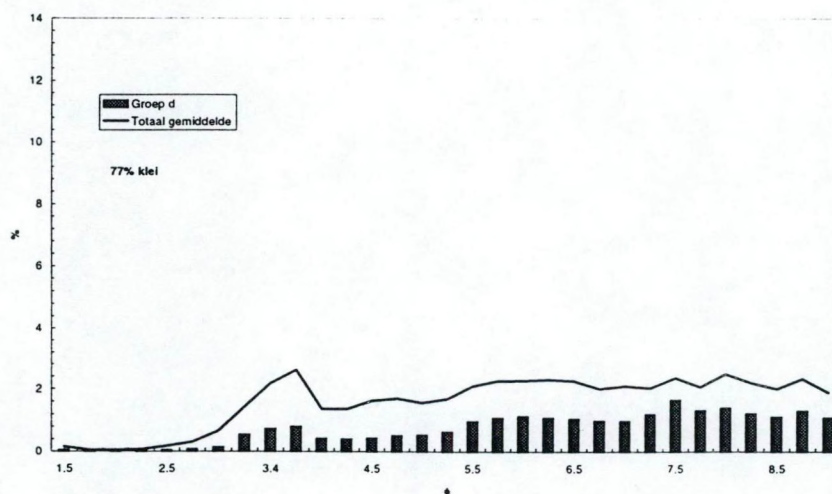
Figuur 11: gemiddelde zand-silt-klei samenstelling van de sedimentgroepen. – *Average sand-silt-clay composition for the calculated grain-size groups.*

Het onderscheid tussen de groepen komt vrij goed tot uiting in een ternair zand-silt-klei diagramma (fig. 11). Hieruit valt duidelijk af te leiden dat 4 van de 7 groepen (groepen a, b, c en d) zeer dicht bij de klei-silt as liggen. Ze vertonen een zandgehalte dat lager is dan 15 %. Het onderscheid dat tussen deze groepen gemaakt kan worden berust op de silt-klei ratio.

Voor de groepen "a" en "d" is deze ratio kleiner dan de eenheid en domineert dus de kleifractie. Binnen de siltfractie kan verder een onderscheid gemaakt worden tussen een grove fractie ($>16 \mu\text{m}$) en een fijne fractie ($<16 \mu\text{m}$). De verhouding waarin deze fracties voorkomen is de silt ratio. De silt ratio bedraagt 0.4 voor sedimenten van de "c" groep en 0.9 tot 1.4 voor sedimenten van de "b" groep. Hieruit volgt dus dat het onderscheid tussen beide groepen gelegen is in de aanwezigheid van een grotere hoeveelheid grof silt in de "b" sedimenten. Sedimenten van de "c" groep bevatten meer fijn silt. Sommige sedimenten hebben een silt-klei ratio die hen doet aanleunen bij hetzij de "a" groep hetzij de "d" groep. Ze worden evenwel hiervan onderscheiden door een hoger zandgehalte. Deze sedimenten werden ondergebracht in respectievelijk de "az" en "dz" groepen. Tot slot is er nog een totaal aparte groep namelijk de "g" groep. De sedimenten in deze groep worden gekenmerkt door een opvallend hoge silt-klei ratio (6.39). Dit is een gevolg van de zeer hoge concentratie aan silt partikels. 75 % van de silt partikels zijn bovendien geconcentreerd in de fijne siltfractie zodat de silt ratio zeer laag is.



Figuur 12: korrelgroottespectrum van groep 'dz' (balkjes). Deze groep komt vooral voor bij de monding van de Schelde. Het gemiddelde spectrum van alle stalen wordt met een doorlopende lijn weergegeven. – Grain-size spectrum of group 'dz' (bars). This group occurs mainly near the river mouth of the Schelde. The average spectrum of all samples is represented by a continuous line.



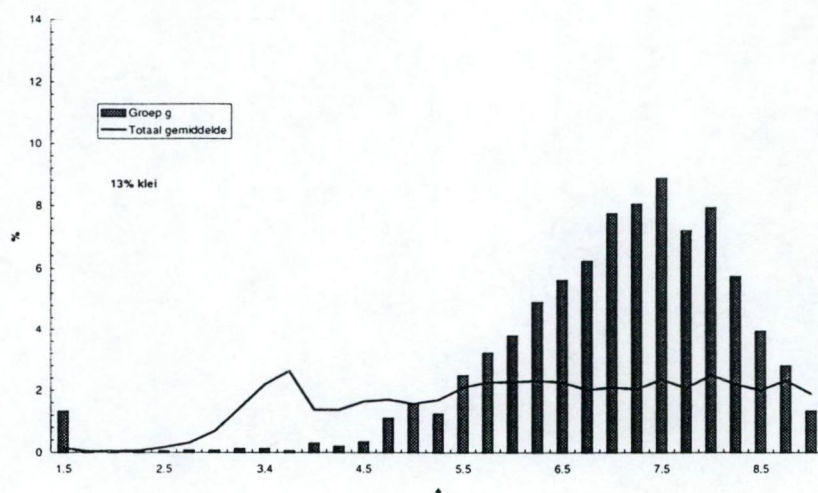
Figuur 13: korrelgroottespectrum van groep 'd' (balkjes). Deze groep wordt waargenomen rond de monding van de Rupel. Het gemiddelde spectrum van alle stalen wordt met een doorlopende lijn weergegeven. – Grain-size spectrum of group 'd' (bars). This group has been observed only near the mouth of the Rupel. The average spectrum of all samples is represented by a continuous line

Regionale spreiding van de sedimentgroepen

Enkele karakteristieke groepen geven een trend aan van de regionale spreiding van deze sedimentgroepen. De niet besproken groepen vormen een overgang tussen de hier naar voor gehaalde voorbeelden en zijn alom tegenwoordig. Groep "dz" vertegenwoordigd fijn zand in suspensie nabij de monding (fig. 12).

De concentratie aan fijn zand daalt van meer dan 40 % nabij de monding tot minder dan 20 % stroomopwaarts van Zandvliet. Een zeer klei-rijk sediment met meer dan 7 % kleipartikels wordt waargenomen in het gebied rond de monding van de Rupel in de Schelde (fig. 13). Het kleigehalte daalt zowel landinwaarts als in de richting van de zee. Deze klei is vermoedelijk geërodeerd uit de onderliggende "Boomse klei" laag. De Schelde en de Rupel vloeien beide langs de cuesta van de "Boomse klei" om na de monding van de Rupel in de Schelde door deze Oligocene laag te snijden.

Zoals eerder opgemerkt vormt groep g een aparte groep van suspensiesedimenten die occasioneel werden waargenomen nabij Zandvliet. Dit sediment is dermate afwijkend dat aan een speciale oorsprong moet gedacht worden. Mogelijk hebben baggerwerken die tijdens de staalname plaats het gesuspendeerd sediment beïnvloed (fig. 14).



Figuur 14: korrelgroottespectrum van groep 'g' (in balkjes). Deze groep wordt waargenomen nabij Zandvliet. Het gemiddelde spectrum van alle stalen wordt met een lijn weergegeven. - *Grain-size spectrum of group 'g' (bars). This group has been observed only Zandvliet. The average spectrum of all samples is represented by a continuous line.*

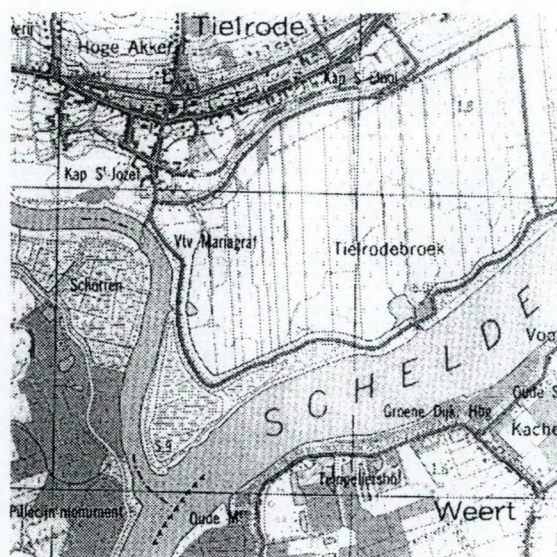
Sedimentatieprocessen op het schor

Situering

In totaal werden vier 13-uursmetingen georganiseerd op en rond het schor van Tielrode, dat zich langs de linkeroever van de Schelde bevindt, nabij de monding van de Durme (fig. 15). Alle metingen werden uitgevoerd in een periode van springtij.

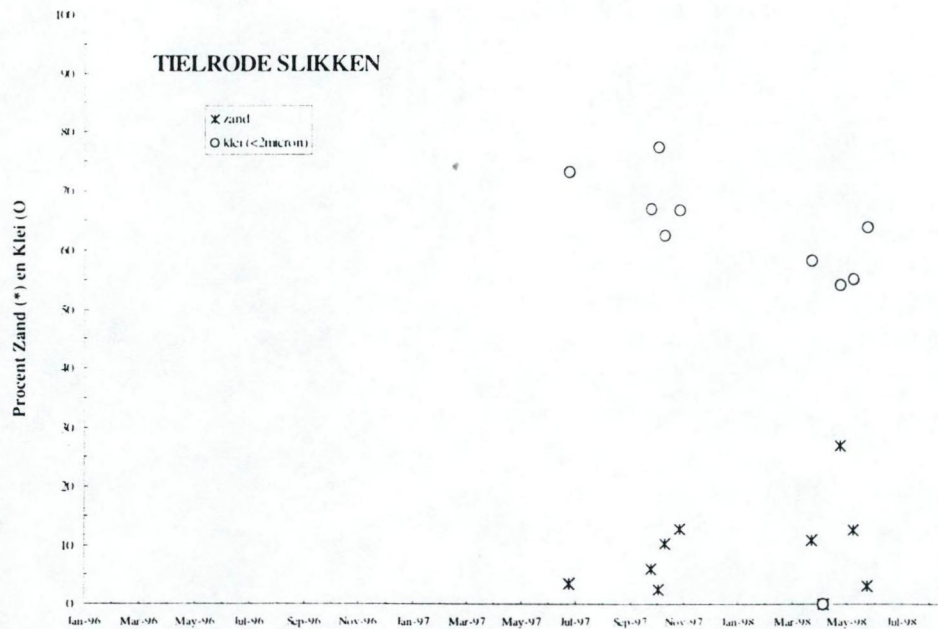
Organisatie

De metingen begonnen telkens op het moment van laag water en duurden door tot het volgend punt van laag water, ongeveer 13 uur later. Tijdens deze cyclus werd het schor bevoloed en liep het ook weer leeg. Metingen werden verricht in de hoofdkreek vanop een speciaal daarvoor aangebrachte brug en tegenover de ingang tot het schor aan boord van een vaartuig (SCALDIS I" voor de campagnes van juli en oktober 1997 en april 1998 en een werkplatform in januari 1998).

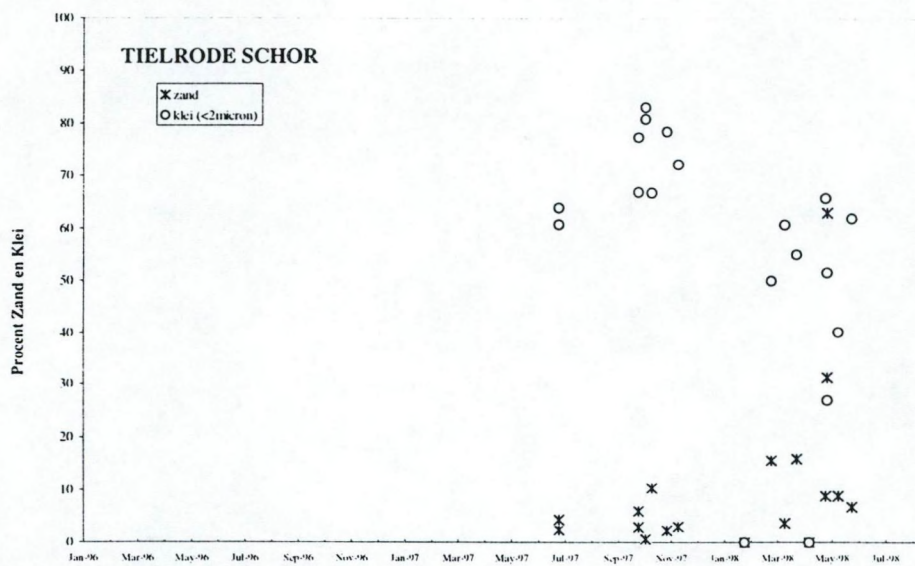


Figuur 15: situering van het schor te Tielrode – Location of the marsh at Tielrode.

Tijdens deze metingen werden suspensiestalen verzameld door het vullen van 60-l recipiënten, gevolgd door een decantatie om het sediment te concentreren. Daarnaast werden ook door middel van OTT-molens stroomsnelheidsmetingen uitgevoerd, statisch op het schor, diepteprofielen vanop het vaartuig op de Schelde. Deze laatste werden aangevuld met suspensiestalen van 250 ml om zo een concentratieprofiel te verkrijgen. Tijdens de vierde meetcampagne werden op het schor eveneens stroomsnelheidsprofielen genomen door via een brug die de kreek overspande een stroommeter manueel op vaste diepten te laten zakken. Onder de brug werd eveneens een CTD-sonde op een vaste positie gehangen. De sonde liet toe op regelmatige tijdstippen de temperatuur, de saliniteit en de turbiditeit te registreren.



Figuur 16: procent zand en klei in het suspensiesediment op de slikken te Tielrode. – *Procent sand and clay of the suspended sediments on the tidal flats of Tielrode*



Figuur 17: procent zand en klei in het suspensiesediment in een schorrekreek te Tielrode. – *Procent sand and clay of the suspended sediments in the marsh creek of Tielrode*

Naast de 13-uursmetingen werden er ook 2 sifonsamplers op het gebied opgesteld. Eén sampler werd gepositioneerd op een stuk slik langs de Schelde, de tweede sampler werd opgesteld in een kreek binnen het schor. Op die manier kan een beeld verkregen worden van het gesuspenseerd materiaal dat zich in de Schelde bevindt, ter hoogte van het schor en het zwevend materiaal binnenin het schor. De resultaten van het korrelgrootte-onderzoek (fig. 16 en 17) tonen aan dat er geen noemenswaardige verschillen bestaan tussen het gesuspenseerd sediment in de kreek en dat op de slikken en dat er in beide

gevallen seizoensgebonden verschillen bestaan in de korrelgrootte samenstelling. De kleifractie is groter in de periode oktober – november dan in het voorjaar en de zomer (maart – juni). Het zandgehalte volgt een omgekeerde trend. In enkele gevallen werd in de schorre-kreek in het voorjaar (mei) een zeer hoog zandgehalte (tot 65 %) waargenomen. De resultaten verkregen in Tielrode komen zeer goed overeen met deze van het meetstation Appels voor dezelfde periode (fig. 9).

Zoals eerder vermeld werden de campagnes telkens rond springtij georganiseerd. Zo konden de 4 campagnes, die over een gans jaar uitgespreid waren, gemakkelijker onderling vergeleken worden. Tijdens de vier campagnes varieerde het tijverschil van 5.36 tot 6.09 m met een minimum waterstand van -0.02 m T.A.W. en een maximum waarde van 6.08 m T.A.W. (tabel 4).

<i>Campagne</i>	<i>juli 97</i>	<i>oktober 97</i>	<i>januari 98</i>	<i>april 98</i>
Getijverschil	5.42	5.36	5.71	6.09
Minimum	0.23	0.48	-0.02	-0.01
Maximum	5.65	5.84	5.69	6.08

Tabel 4: overzicht van het tijverschil en laag- en hoogwaterstanden (in m T.A.W) tijdens de meetcampagnes. – *Overview of tidal ranges and low- and high water levels (in m above the Belgian ordnance level) during measuring periods.*

Stroomsnelheid

De stroomsnelheid in de rivier en de snelheid waarmee het water de kreek instroomt en er terug uit wegtrekt (tabel 5) zijn afhankelijk van het tijamplitude en het bovendebiet, dat op zijn beurt afhankelijk is van de heersende weersomstandigheden.

<i>Campagne</i>	<i>juli 97</i>	<i>oktober 97</i>	<i>januari 98</i>	<i>april 98</i>
Gemiddeld	0.17	0.22	0.20	0.28
Maximum	0.24	0.47	0.38	0.44

Tabel 5: stroomsnelheden, in m.s^{-1} , in de toegangseu tot het schor. - *Current velocities at the entrance of the marsh*

De maximale stroomsnelheid in de toegangseu varieerde van 0.2 tot 0.5m.s^{-1} . Er bestaat een rechtstreeks verband tussen de maximum stroomsnelheid en het tijverschil

Gesuspendeerd materiaal

Conclusies uit de seizoensgebonden variatie van het gesuspendeerd sediment trekken is minder gemakkelijk. De tijgemiddelde waarden variëren van 350 mg/l tot ongeveer 900 mg/l, terwijl de maxima zich in het gebied van 2 tot 3.5 g/l situeren (tabel 6).

Bij de campagnes juli en oktober 97 liggen de gemiddelde waarden van de concentratie aan gesuspendeerd materiaal hoger dan bij campagnes januari en april 98. Alhoewel we een laag debiet en verlaagde stroomsnelheden in de zomerperiode verwachten, blijkt het gehalte aan gesuspendeerd materiaal hoog te zijn. De hoge stroomsnelheden in april leveren evenmin de verwachte hoge turbiditeitswaarden op. Dit leidt tot de veronderstelling dat de toegangseu van het schor als een apart systeem is dat niet

beïnvloed wordt door seizoensveranderingen. De turbiditeitspieken ($2\text{--}3.5 \text{ g.l}^{-1}$) zouden hun oorzaak kunnen vinden in een systeem van locale resuspensie- en sedimentatie op de slikken.

<i>Campagne</i>	<i>juli 97</i>	<i>oktober 97</i>	<i>januari 98</i>	<i>april 98</i>
Gemiddelde	873	712	362	337
Maximum	2979	3243	2635	1969

Tabel 6: suspendeerd sediment, in mg.l^{-1} , in de toegangsgeul. – *Suspended sediment concentrations, in mg.l^{-1} , in the access creek to the marsh.*

Stroomsnelheid in de Schelde

De stroomsnelheid in de Schelde is slechts vanaf de tweede campagne, in oktober 1997, opgemeten geworden. Een overzicht van de maximum waarden is in tabel 7 weergegeven. Hierbij bemerken we dat er van oktober 1997 naar april 1998 toe een stijging waarneembaar is. Dit kan verklaard worden door het toenemende tijverschil van oktober 1997 naar april 1998, maar een combinatie met seizoensgebonden variatie is niet uitgesloten.

<i>Campagne</i>	<i>oktober 97</i>	<i>januari 98</i>	<i>april 98</i>
Gemiddelde	0.81	0.89	0.85
Vloed maximum	1.24	1.38	2.01
Eb maximum	1.18	1.20	1.91

Tabel 7: stroomsnelheden, in m.s^{-1} , in de hoofdgeul van de Schelde. – *Current velocities, in m.s^{-1} , in the main channel of the Schelde*

Het verschil tussen oktober 1997 en april 1998 is bijna 0.8 m.s^{-1} voor de vloed, praktisch 0.7 m.s^{-1} voor de eb. De stromingsmaxima zijn telkens terug te vinden tijdens de vloed, hoewel de verschillen klein zijn. Op zijn hoogst bedraagt de afwijking 0.18 m.s^{-1} (campagne van 27 januari 1998).

Vergelijken we deze gegevens met die van de in- en uitstroming van het schor, dan zien we dat de gegevens onafhankelijk zijn van elkaar. Hoewel we een maximale stroomsnelheid van 2.01 m.s^{-1} op de Schelde terugvinden in april 1998, is de stroomsnelheid in de toegangsgeul het hoogst in oktober 1997 (tabel 5). In de toegangsgeul is er een terugval in maximale stroomsnelheid van oktober 1997 naar januari 1998 (van 0.47 naar 0.38 m.s^{-1}), terwijl er een toename is op de Schelde (van 1.24 naar 1.38 m.s^{-1}). Een mogelijke verklaring zou zijn dat de ene meting die de maximumstroomsnelheid in de toegangsgeul in oktober 1997 weerspiegelt een foutief meetpunt is. De andere campagnes vertonen namelijk een vrijwel gelijke in- als uitstromingssnelheid, terwijl de uitstromingssnelheid in oktober 1997 een stuk hoger ligt. Zonder dat punt zou de snelheid lager liggen en zouden de metingen ook toenemen van juli 1997 naar april 1998, zoals de metingen op de Schelde. Dit zou dan weer stroken met het toenemende tijamplitude van de eerste naar de laatste meetcampagne toe.

Turbiditeit in de Schelde

Tabel 8 geeft een beeld van de variatie van gesuspendeerd sediment uitgemiddeld over de waterkolom. De gemiddelde waarden van januari 1998 (winter) liggen duidelijk hoger dan die van de twee andere campagnes. De maxima waarden verschillen met de concentratiewaarden van de geul naar het schor. De maxima in de Schelde schommelen nogal sterk – een maximum van 18.5 g.l^{-1} bij januari 1998, waarschijnlijk een staal dat zeer dicht bij de bodem genomen werd, in de laag waar een sterk toenemend gradiënt voorkomt. In de toegangsgeul blijven de maximumconcentraties vrij homogeen en bedraagt ongeveer $2 \text{ à } 3 \text{ g.l}^{-1}$.

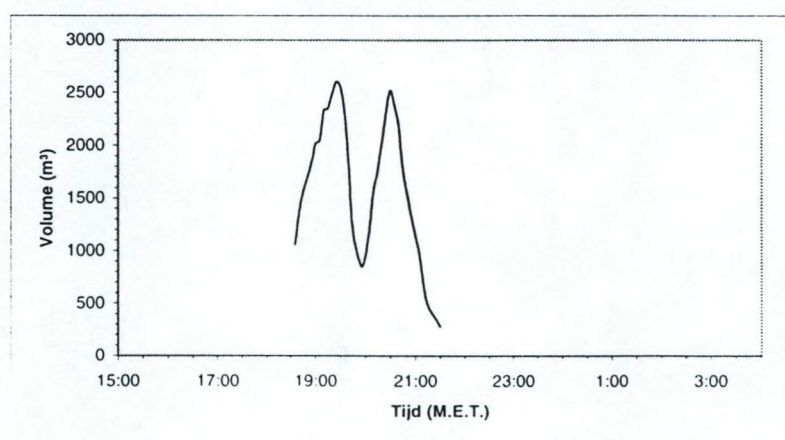
<i>Campagne</i>	<i>oktober 97</i>	<i>januari 98</i>	<i>april 98</i>
Vloed gemiddelde	225	439	277
Eb gemiddelde	261	864	429
Max	503	18491	2712

Tabel 8: concentratie aan gesuspendeerd sediment in de hoofdgeul van de Schelde, in mg.l^{-1} . – *Concentration of suspended sediments in the main channel of the Schelde, in mg.l^{-1} .*

Massabalans

Tijdens de laatste campagne werd getracht meer gedetailleerde cijfers te bekomen omtrent het heersende debiet in de toegangsgeul tot het schor. Hiervoor werd naast de gewone, vaste stroommeters een mobiele stroommeter ingezet, waarmee het mogelijk was diepteprofielen te meten en dit op regelmatige afstanden, dwars over de geul. In combinatie met andere parameters zoals sedimentlading, concentratie aan Cl^- , NO_3^- , NH_4^+ , ... kan een massabalans bekomen worden voor deze stoffen.

Voor de IV^e campagne (april 1998) staan de resultaten voor het sedimenttransport hieronder. De eerste grafiek (figuur 18) geeft het volume water (m^3) dat door de geul passeert in functie van de tijd weer. De grafiek eronder (figuur 19) geeft het verloop van het transport samen met de concentratie aan gesuspendeerd sediment weer.

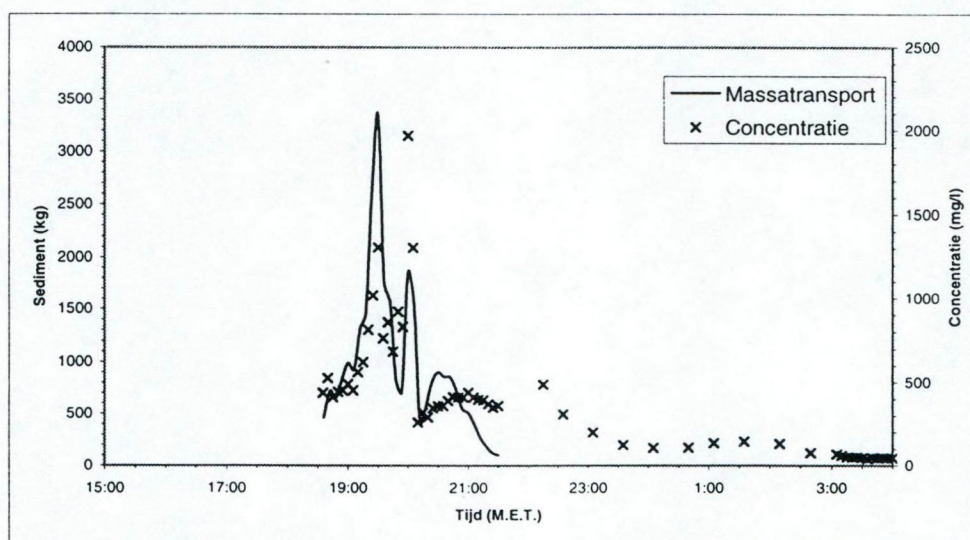


Figuur 18: waterdebiet doorheen de toegangsgeul van het schor. – *Water discharge trough the access creek to the marsh.*

Gemiddeld stroomde er per minuut 288 m^3 water naar binnen, tegenover 223 m^3 naar buiten. De maximumwaarde bij het instromen bedroeg per minuut 433 m^3 en 420 m^3

bij uitstroming. Dit lager gemiddelde voor het naar buiten stromen van het water is te verklaren door de remmende werking die het schor uitoefent op het stromende water. Immers, vanaf het moment bij eb dat het waterpeil onder de geulopening is gezakt stroomt er nog water na tot op het moment bij vloed dat het waterpeil de geulopening weer heeft bereikt. In totaal gaat er 26000 m³ water in het schor tijdens vloed tot aan hoogwater kentering. Tijdens het leegstromen wordt er 23501 m³ water verplaatst. Dit geeft een tekort van ongeveer 9.6 %. Er moet echter nog rekening gehouden worden met het nasijpelend water, dat nog voor een constante uitstroming van het schor zorgt, zodat het verschil tussen in- en uitstromen in werkelijkheid kleiner zal zijn.

Het sedimenttransport bedroeg bij vloed gemiddeld 225 kg.min⁻¹, met een maximum van 558 kg.min⁻¹, terwijl bij eb de gemiddelde en maximumwaarde respectievelijk 112 kg.min⁻¹ en 310 kg.min⁻¹ bedroegen. Hierbij moet wel rekening gehouden worden dat de concentratiemeting op 1 punt aan de instromingsgeul waarschijnlijk niet representatief is voor de gehele opening. In totaal werd er tijdens deze campagne 17544 kg sediment het schor binnengebracht en 11392 kg sediment vond weer zijn weg naar buiten. Let wel op het feit dat nadat het water zich uit de kreek heeft weggetrokken er misschien nog heel wat sediment wordt nagespoeld. Hier kunnen echter geen betrouwbare cijfers op geplakt worden, doordat het ons aan voldoende turbiditeitswaarden en stroomsnelheidsgegevens voor die fase ontbreekt. In werkelijkheid zal het tekort van 35 % dus wel lager liggen, maar dit getal geeft toch wel aan dat er een belangrijke aanslibbing van het schor gebeurt.

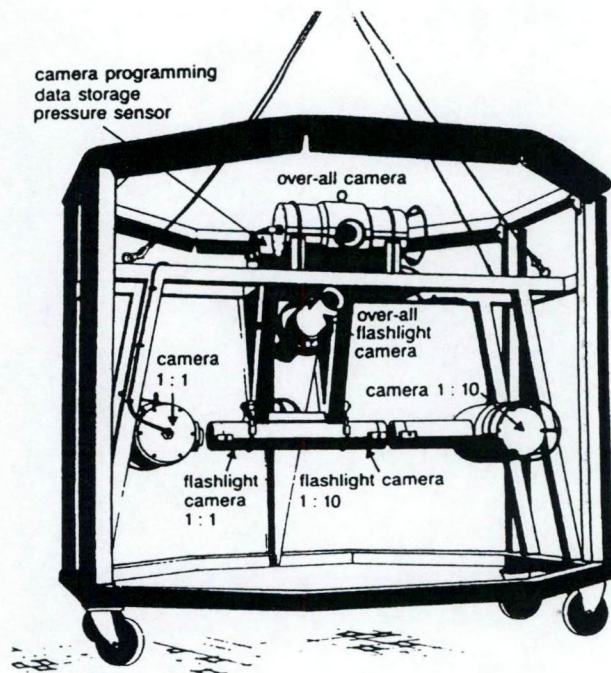


Figuur 19: massatransport doorheen de toegangsgeul van het schor. - *Mass transport through the access channel to the marsh.*

Tijdens deze tijcyclus zal er dus een maximum van 6150 kg sediment over het schor verdeeld achtergebleven zijn. De totale oppervlakte van het schor werd geschat op ongeveer 102000 m² door middel van een OTT planimeter op een topografische kaart van het Nationaal Geografisch Instituut (kaart 15/5-6, Sint-Niklaas – Temse, 1:25000). Mocht het sediment over het gehele schor verspreid zijn, dan komt dit neer op ongeveer 60 g per vierkante meter. Zoals reeds vermeld is dit naar alle waarschijnlijkheid een maximumwaarde en zal die in realiteit lager liggen.

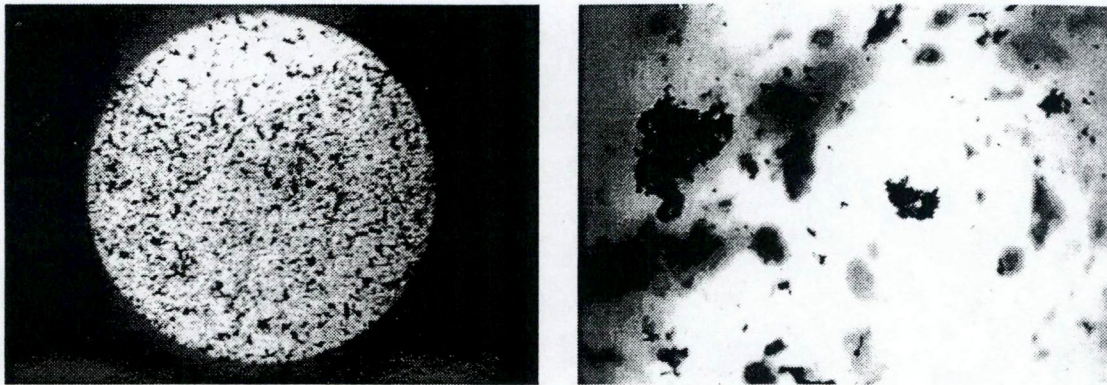
Vlokvorming in het estuarium

De sedimentatiesnelheid op het schor wordt in belangrijke mate bepaald door de vorming van sedimentvlokken. Het nemen van suspensiestalen met als doel de gesuspendeerde vlokken te bestuderen is een delicate kwestie. De vlokken zijn zeer broos en zullen uiteenvallen van zodra ze bemonsterd worden (Eisma *et al.*, 1983; Kranck, 1984; Eisma, 1986; Wells & Shanks, 1987). Door deze fragiliteit is weinig gekend over de *in situ* grootte van vlokken. Een aantal *in situ* technieken is ontworpen om de vlokken te bestuderen en hun grootte te analyseren, waaronder de benthoscamera van het Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee (NIOZ) (Eisma *et al.*, 1990). Het systeem bestaat uit een octagonaal roestvrij stalen frame, 180 cm hoog, 200 cm in diameter en met een gewicht van 800 kg (fig. 20). In dit frame zijn 3 camera's zo gemonteerd dat er een minimale verstoring is van het stromingspatroon door het frame en langs de cameraraampjes. De camera's zitten elk in een roestvrij stalen cilinder met de lens achter een 45 mm dik conisch venster. De 1:1 en 1:10 camera's zijn horizontaal naar een flitssysteem georiënteerd. De derde camera die een overzichtbeeld levert, werd bij onze campagnes niet gebruikt.



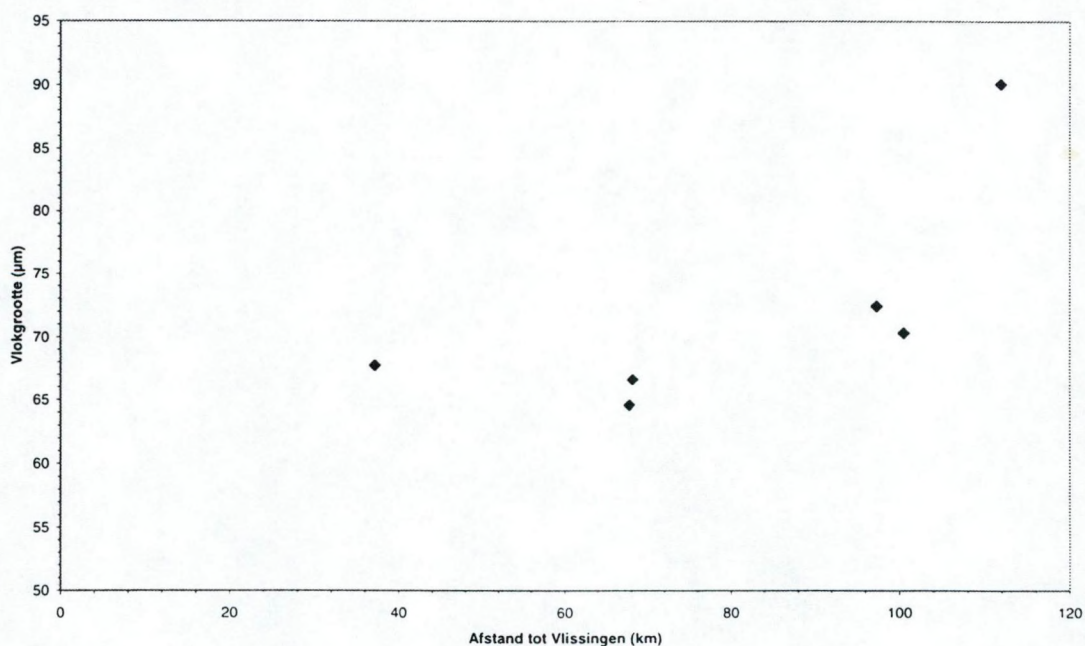
Figuur 20: schema van de benthoscamera. - *The benthos camera*

De gebruikte camera's zijn professionele Nikon F3 fototoestellen met een magazijn voor 250 opnamen. Een computer stuurt de apparaten en zorgt dat er elke keer een reeks van 14 foto's wordt genomen (fig. 21). De negatieven worden onder de microscoop gedigitaliseerd en verwerkt via een "image analysis" programma. De vlokdistributie is gebaseerd op een telling van minstens 300 vlokken per camera, zodat de statistische verwerking redelijk betrouwbaar is.



Figuur 21: vlokfoto's genomen met de benthoscamera. Links: 1:1-camera foto die een overzicht geeft van de concentratie, rechts 1:10-camera foto met duidelijke vlokken. – Photographs of flocs taken with the benthos camera. Left a 1:1 photograph giving a general image of the sediment concentration and right a 1:10 photograph showing flocs

De metingen tonen aan dat vlokken met een gemiddelde doormeter tussen 65 en 75 μm over hele estuarium voorkomen. Er is een tendens van de vlokken om in grootte toe te nemen van Antwerpen naar Tielrode toe. Het verschil in gemiddelde vlogk grootte tussen Antwerpen en Tielrode bedraagt 20 μm (fig. 22)



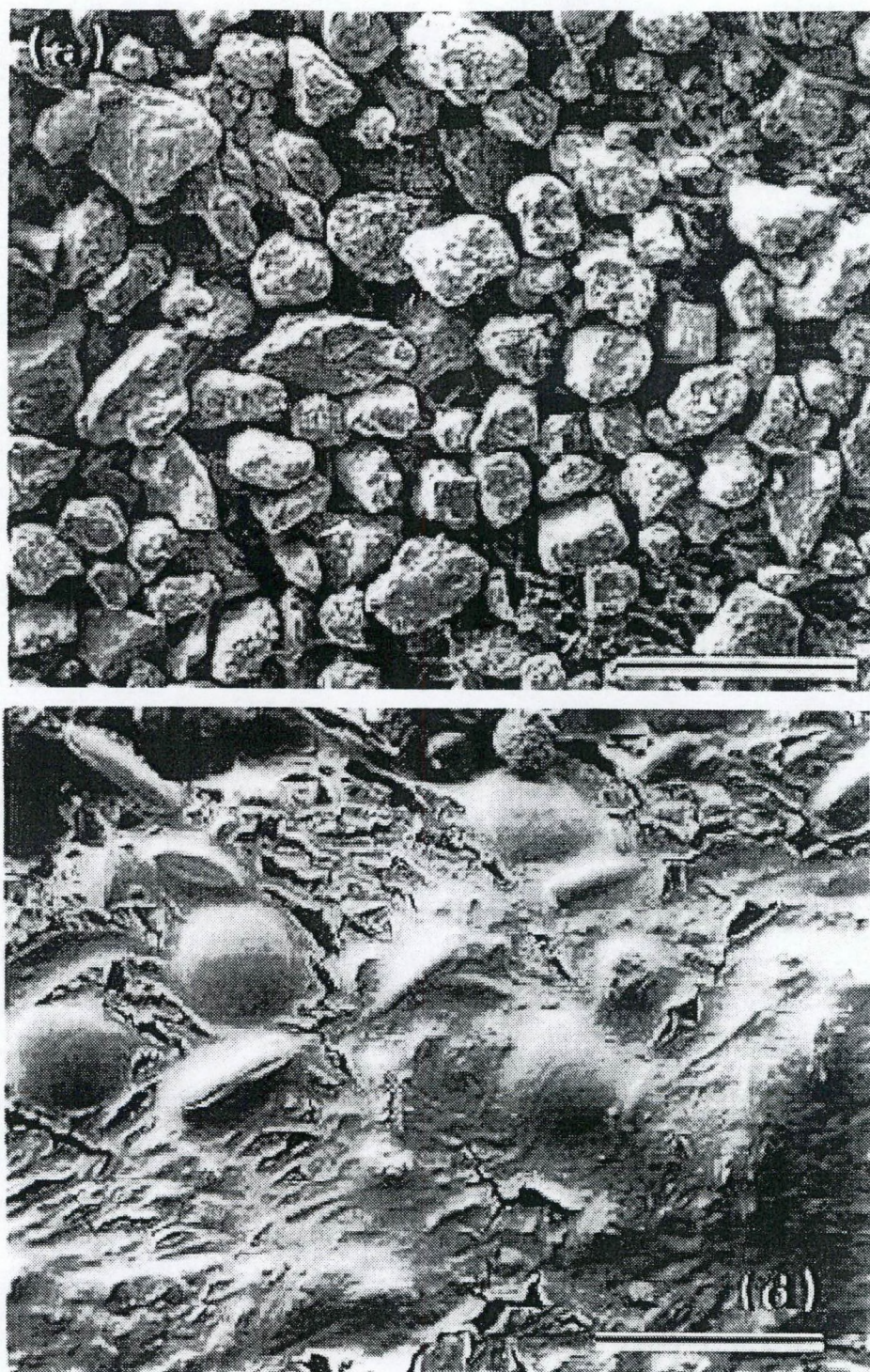
Figuur 22: vlogk grootte gemeten met de benthos camera (Eisma) 1996-1998. - Floc sizes measured with the benthos camera.

De toename van de vlogk grootte stemt overeen met de eerdere bevinding dat het kleigehalte in de regio rond de Rupel toeneemt. Klei is samen met het organisch materiaal een belangrijke factor voor het vormen van vlogken. Grovere fracties zoals zand en silt lenen zich daartoe niet, door het ontbreken van ladingen aan het korreloppervlak. Dit sluit evenwel niet uit dat deze korrels in een netwerk van vlogken

kunnen vastgehouden worden. Het aaneenklitten van suspensiepartikels verleent aan vlokken een ruimtelijk structuur waarin en waarrond zich allerlei (bio-)chemische processen kunnen afspelen.

De interactie tussen het mariene milieu en het gesuspendeerd sediment is niet eenvoudig. Het is niet alleen de samenstelling van het sediment die de oppervlakte voor processen bepaald; andere factoren zoals de hoeveelheid organisch materiaal, het specifiek oppervlak eigen aan het sedimenttype, saliniteit, turbiditeit en de hydrodynamica bepalen de uiteindelijk vloggrootte en bijgevolg de mogelijkheid tot interactie met het milieu. Dat die wisselwerking belangrijk is kan met een aantal foto's geïllustreerd worden. De micro-organismen vertonen duidelijk een interactie met de sedimentpartikels en dragen hier bij tot de consolidatie van de sedimenten door de uitscheiding van EPS (extracellulaire polymere substanties). Op die manier zullen ze in grote mate de erosie/sedimentatieprocessen in het estuarium gaan bepalen.

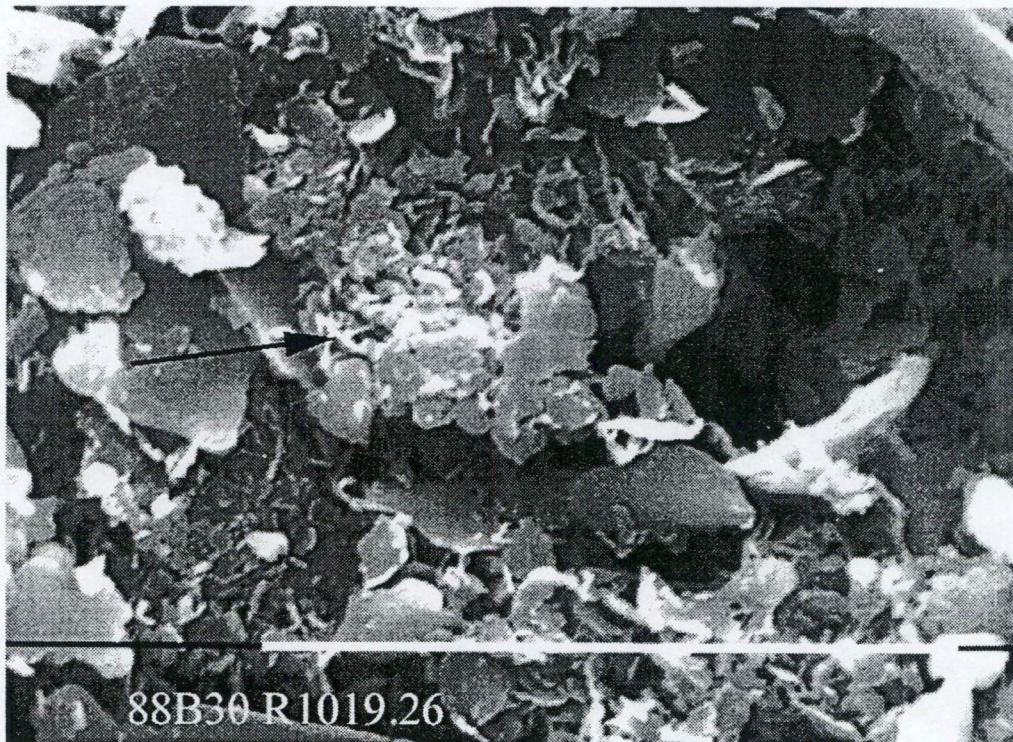
De figuren op de volgende bladzijden geven een overzicht van de interactie tussen sedimentpartikels en micro-organismen.



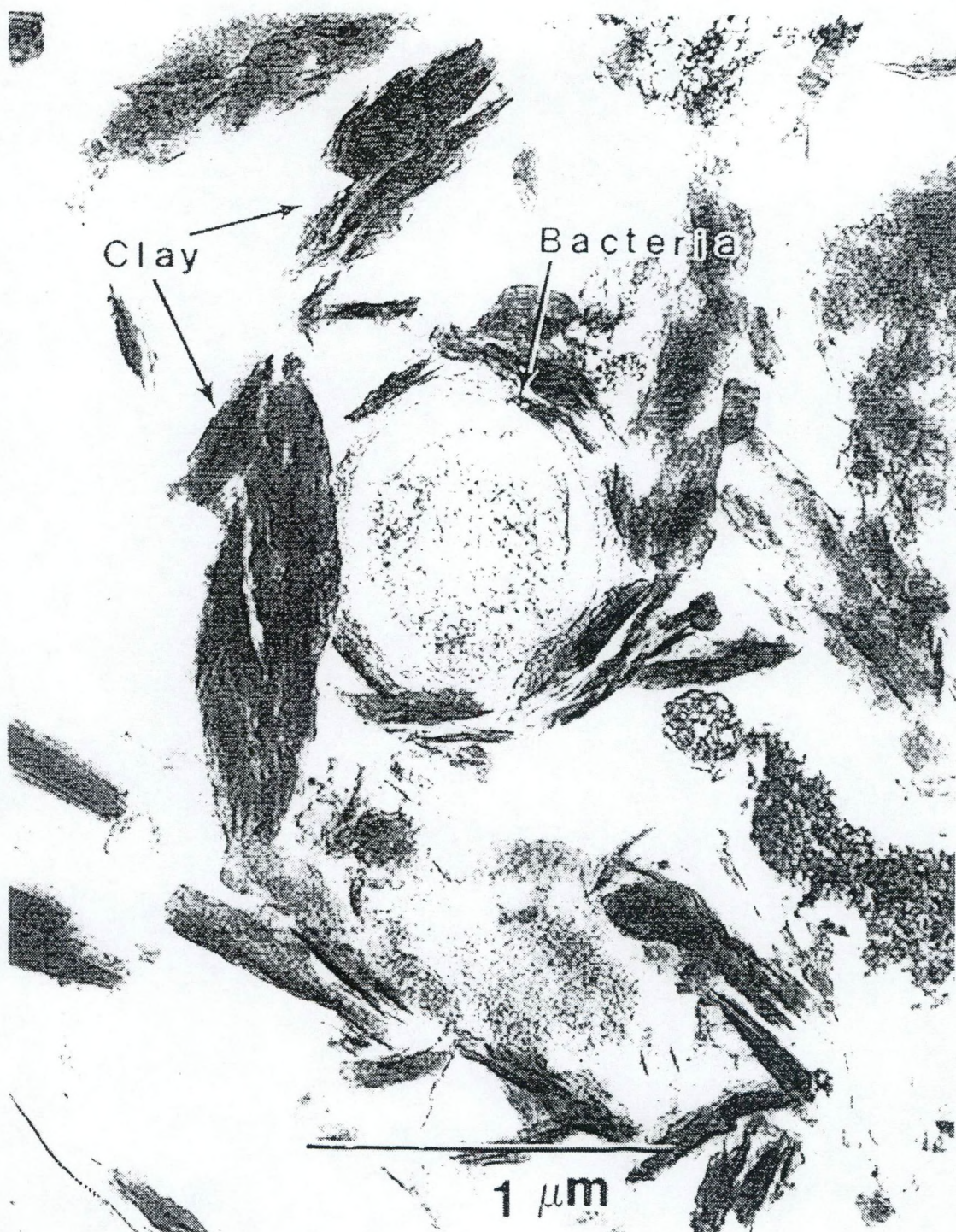
Figuur 23. sedimenten van de slikken (a) juist na afgaand water en zonder protozoa, en (b) 4 uur na afgaand water. De aanwezigheid van de protozoa euglemda in (b) is duidelijk zichtbaar, het sediment is bedekt door een mucilagineuze matrix die tijdens het droogvallen van het slikken-oppervlak ontstaat. *Figure 23. sediments from the mudflats (a) shortly after ebbing tide and without protozoa, and (b) 4 hours later. The sediments are covered by a mucilagenous matrix which is produced by the protozoa during the drying of the mudflat surface. (a) is 100 μ m. (Petersen et al., 1990).*



Figuur 24: kettingvormige vlokken in Noordzee slib (maatstreep is 10 μm). – *Chains of flocs in North Sea mud (bar is 10 μm).*



Figuur 25: bolvormige vlok in Scheldeslib. Dergelijke vlokken kunnen door bacteria gevormd worden (maatstreep is 10 μm). - *Spherical shaped flocs in the Schelde mud. Similar flocs may be formed by bacteria (bar is 10 μm).*



Figuur 26 bacterien omgeven door kleipartikels. *Bacteria surrounded by clay particles forming spherical shaped flocs (Bennet et al. 1997)*

Sedimentatiesnelheid in het estuarium

De Radio-Isotopen

Radio-isotopen worden sinds vele jaren gebruikt om de ouderdom van gesteenten te bepalen. Deze ouderdomsbepaling berust op het principe dat de radioactieve desintegratie voor ieder isotoop aan een constante snelheid, de vervalconstante (λ) verloopt. Om een nauwkeurige ouderdom te bepalen moet dus de activiteit van het isotoop nauwkeurig gemeten worden en moet ook de oorspronkelijke activiteit gekend zijn. Een meer recente toepassing van deze isotopen methode bestaat erin om met behulp van het ^{210}Pb de accumulatiesnelheid van estuariene en mariene sedimenten te bepalen (o.m. Oenema & DeLaune, 1988; Kearney & Stevenson, 1991). Sinds een tiental jaren zijn er eveneens pogingen ondernomen om met dezelfde methode ook de verhouding fluviaal tot marien sediment in estuariene suspensies te schatten (Olsen et al., 1989). Op analoge wijze wordt in deze studie de activiteit van het ^{210}Pb -isotoop gebruikt om het aandeel van het geresuspendeerd sediment in het totaal aanwezige suspensiesediment te schatten.

Gedurende verschillende jaren werden metingen verricht op suspensiesedimenten uit het Schelde estuarium. Stalen genomen sinds 1990 werden onderzocht op hun radio-isotopen samenstelling. De activiteiten van zowel het ^{210}Pb als het ^{226}Ra werden bepaald. Het exces aan ^{210}Pb werd berekend door het verschil te maken tussen de activiteit van het ^{226}Ra en het ^{210}Pb . Hierbij werd uitgegaan van de veronderstelling dat de activiteiten van beide isotopen met elkaar in evenwicht zijn. Daar ^{210}Pb zich vasthecht aan de fijnere fracties wordt de activiteit van het ^{210}Pb uitgedrukt in $\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{klei}^{-1}$, zodat het meetresultaat onafhankelijk is van de hoeveelheid fijn sediment dat in de suspensie aanwezig is.

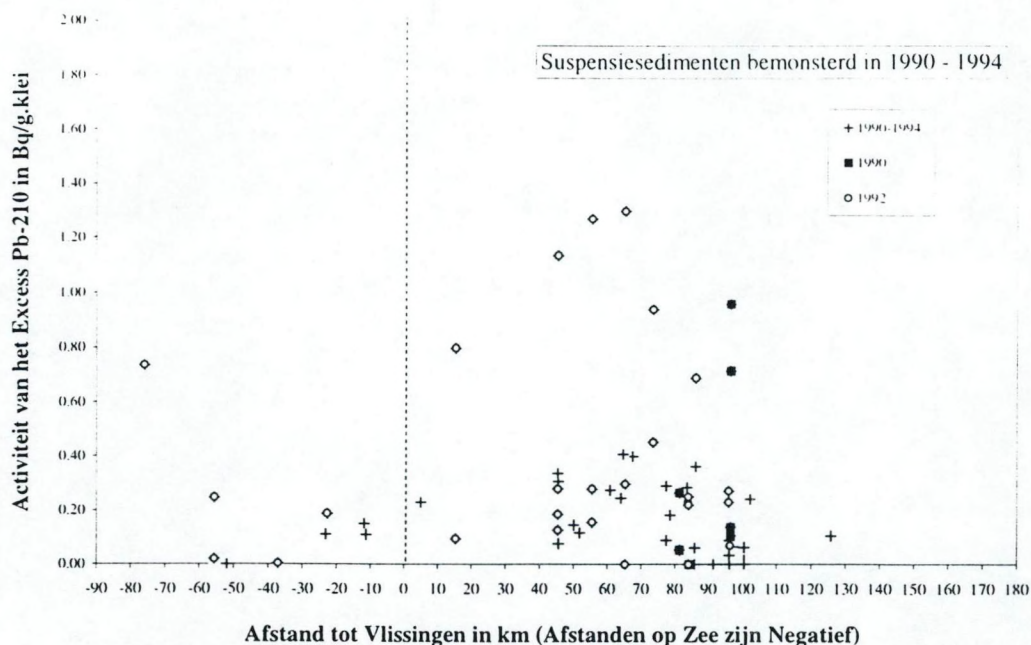
De resultaten zijn weergegeven in figuren 27-29. Om het aantal figuren te beperken werden de resultaten van meerdere jaren gegroepeerd.

Het exces ^{210}Pb varieert van bijna niets tot $1.3 \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{klei}^{-1}$. Uit de figuren kunnen drie zaken afgeleid worden:

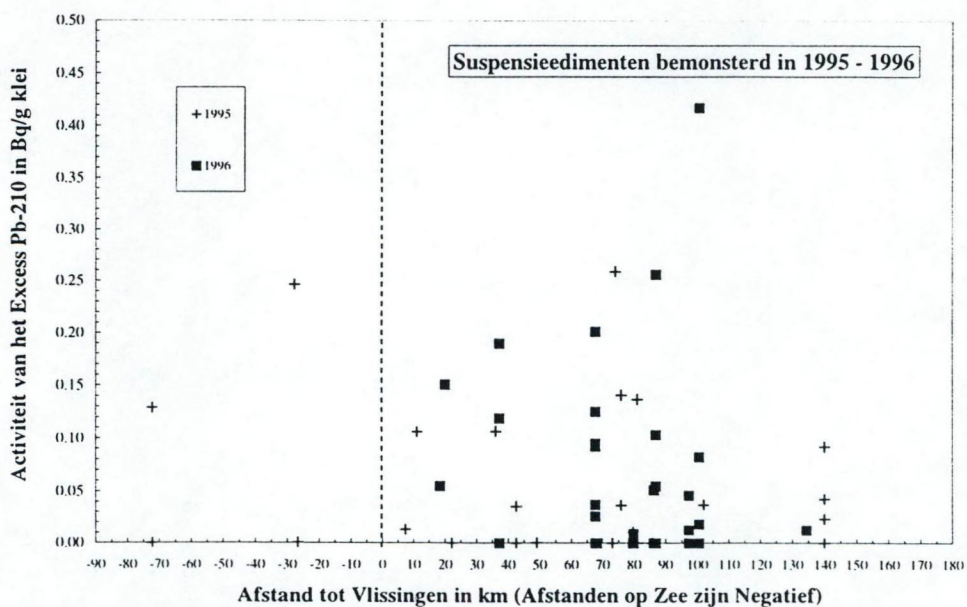
- Voor alle plaatsen en voor ieder jaar treden belangrijke verschillen op in het exces ^{210}Pb . In welke mate deze verschillen hetzij seizoenaal, hetzij met het tij of met het bovendebiet gecorreleerd zijn werd nog niet onderzocht.
- Voor alle waarnemingsperiodes werd een landinwaartse toename aan het exces ^{210}Pb vastgesteld. Er treedt dus wel degelijk een concentratie in het troebelheidsmaximum op. De hoogste activiteiten werden waargenomen in het gebied tussen Zandvliet en de Rupelmonding. In datzelfde gebied komt ook het troebelheidsmaximum van het Schelde estuarium voor.

Er is een duidelijk verschil waarneembaar tussen de hoogste activiteiten waargenomen in de periode 1990-1992 ($> 0.7 \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{klei}^{-1}$) en de hoogste activiteiten in latere jaren waargenomen (steeds $< 0.5 \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{klei}^{-1}$). Men kan dus stellen dat vanaf 1993 er een terugval is in de activiteit van het ^{210}Pb in het suspensiesediment. Aangezien er geen reden is om een verandering in de aanvoer van het ^{210}Pb isotoop te veronderstellen. De vermindering van de activiteit van het ^{210}Pb isotoop moet dus een andere oorzaak

hebben, waarschijnlijk een toename aan de hoeveelheid geresuspendeerd bodemsediment.



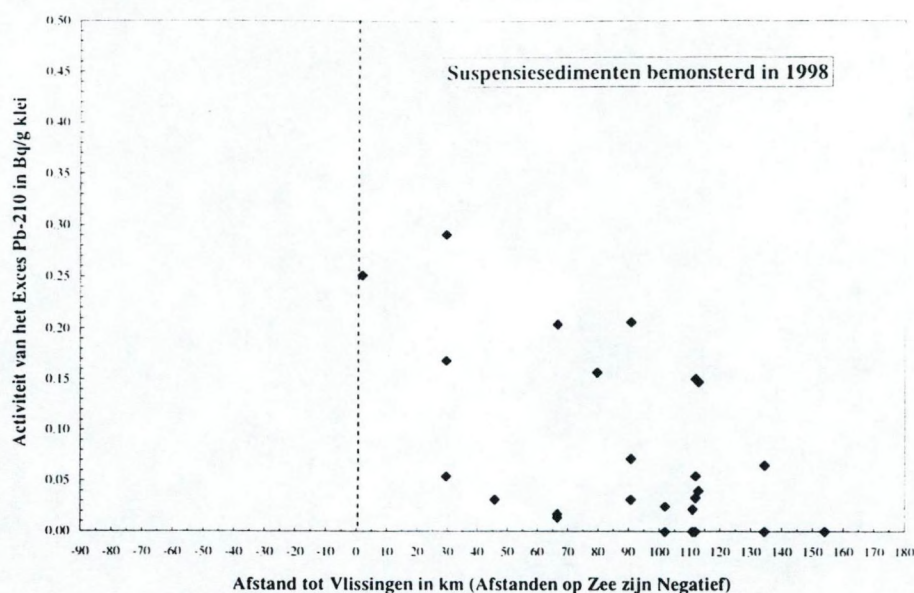
Figuur 27: exces activiteit van het ^{210}Pb in $\text{Bq.g}^{-1}.\text{klei}^{-1}$ voor suspensiesedimenten uit de periode 1990-1994. - Excess activity of ^{210}Pb , in $\text{Bq.g}^{-1}.\text{clay}^{-1}$, of suspended sediments for the period of 1990-1994.



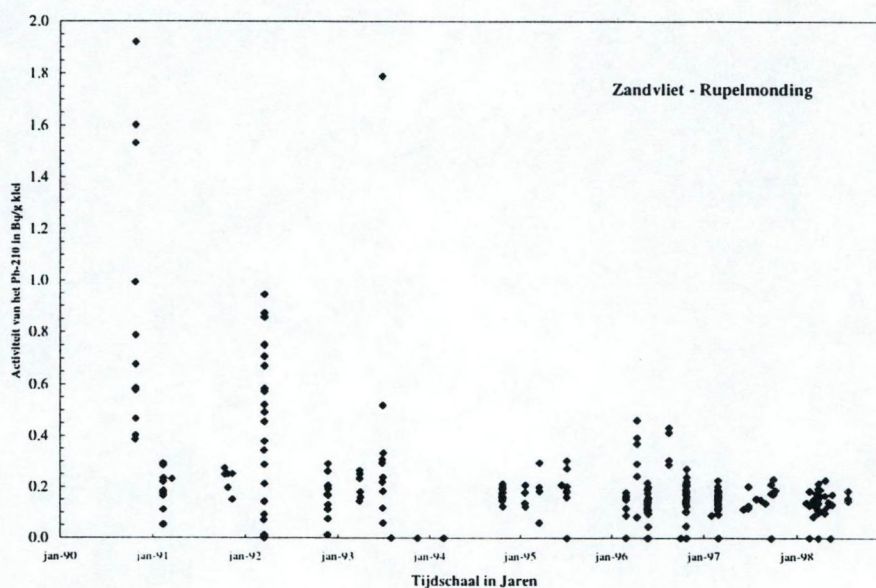
Figuur 28: exces activiteit van het ^{210}Pb in $\text{Bq.g}^{-1}.\text{klei}^{-1}$ voor suspensiesedimenten uit de periode 1995-1996. - Excess activity of ^{210}Pb , in $\text{Bq.g}^{-1}.\text{clay}^{-1}$, of suspended sediments for the period of 1995 -1996.

Men kan nu de vraag stellen of er ook in de tijd een evolutie merkbaar is. Met dit doel voor ogen werden de bekomen resultaten van het ^{210}Pb onderzoek uitgezet volgens een tijdschaal uitgedrukt in jaren (figuur 30). De meetresultaten hebben betrekking op

suspensiesedimenten bemonsterd in het troebelheidsmaximum (Zandvliet-Rupelmonding).

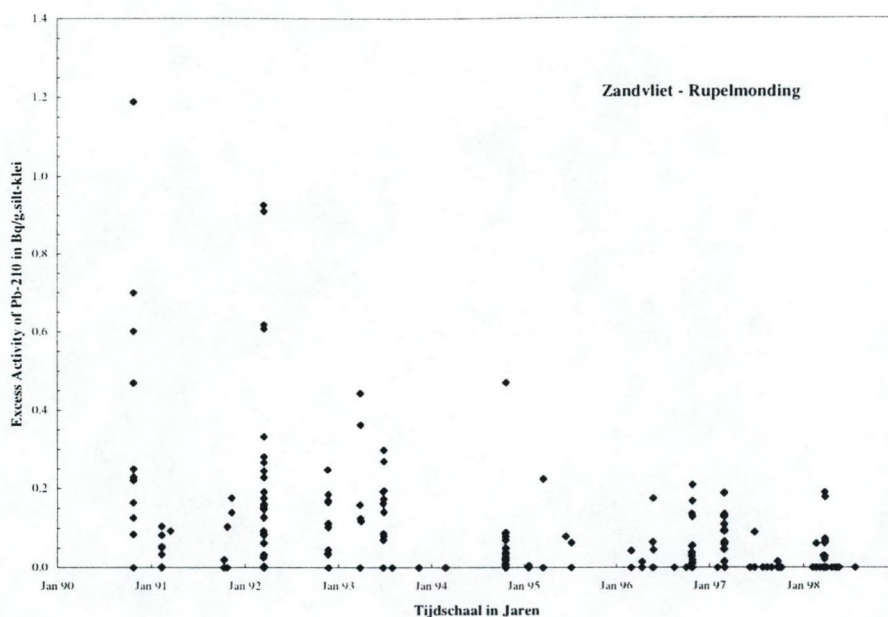


Figuur 29: exces activiteit van het ^{210}Pb in $\text{Bq.g}^{-1}.\text{klei}^{-1}$ voor suspensiesedimenten uit de periode 1998. - Excess activity of ^{210}Pb , in $\text{Bq.g}^{-1}.\text{clay}^{-1}$, of suspended sediments for the period of 1998.

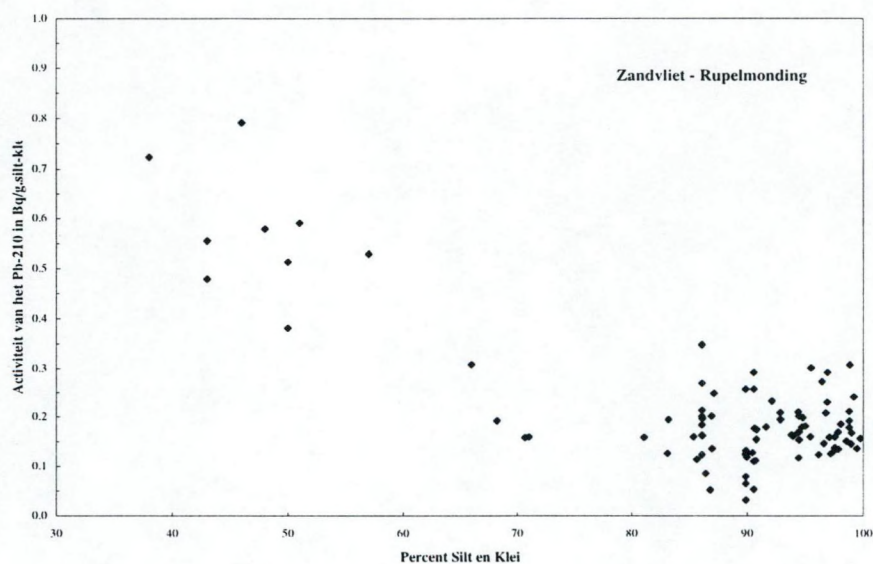


Figuur 30: activiteit van het $\text{Bq.g}^{-1}.\text{klei}^{-1}$ voor sedimenten bemonsterd in de periode 1990-1998. - Activity of ^{210}Pb , in $\text{Bq.g}^{-1}.\text{clay}^{-1}$, of suspended sediments for the period of 1990-1998.

Het valt hierbij onmiddellijk op dat in 1990 het suspensiesediment een aanzienlijk hogere totale ^{210}Pb activiteit vertoonde dan in de daaropvolgende jaren. Bekijkt men het exces aan ^{210}Pb dan bemerkt men niet alleen hogere waarden in 1990 maar eveneens een lichte verhoging van de exces activiteit op het einde van 1996 (figuur 31). Metingen uitgevoerd in 1995 daarentegen vertoonden zeer lage waarden.



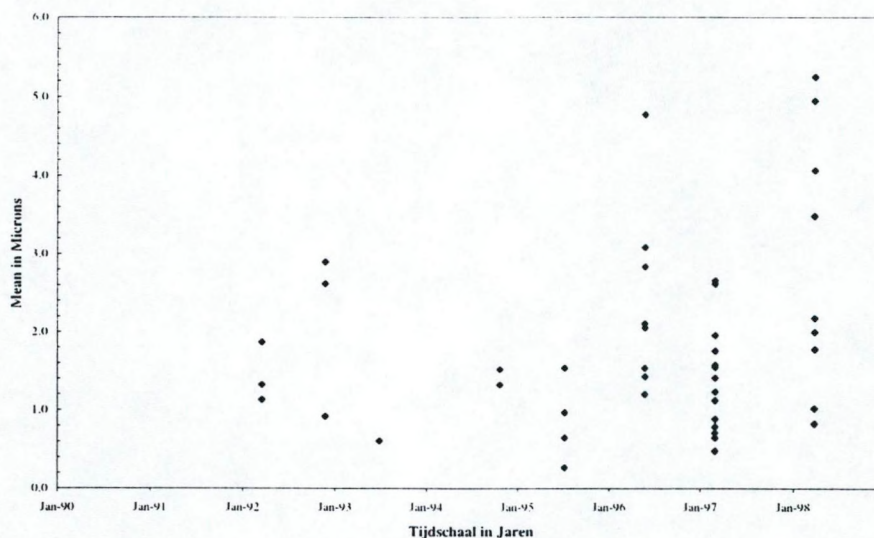
Figuur. 31: exces-activiteit van het ^{210}Pb in $\text{Bq.g}^{-1}.\text{klei}^{-1}$ voor sedimenten bemonsterd in de periode 1990-1998.-
Excess activity of ^{210}Pb , in $\text{Bq.g}^{-1}.\text{clay}^{-1}$, of suspended sediments for the period of 1990-1998.



Figuur. 32: activiteit van het ^{210}Pb in $\text{Bq.g}^{-1}.\text{klei}^{-1}$ ten opzichte van percentage silt-klei in het suspensiesediment.
- Activity of ^{210}Pb , in $\text{Bq.g}^{-1}.\text{clay}^{-1}$, of suspended sediments compared to percentage silt and clay.

Deze veranderingen in de tijd kunnen niet verklaard worden door een verandering in de aanvoer van het ^{210}Pb isotoop. Er dient dus een verklaring gezocht te worden in de herkomst van het aangevoerde sediment. Een verband tussen de korrelgrootte en het exces ^{210}Pb behoort hierbij tot de mogelijkheden. Vergelijkt men de totale hoeveelheid ^{210}Pb en het silt-klei gehalte (alle sediment $<63\mu\text{m}$) dan blijkt er inderdaad een negatief verband te bestaan. Hogere gehalten aan fijn sediment stemmen overeen met een lagere ^{210}Pb activiteit (figuur 32). Een minimum waarde van ongeveer $0.15 \text{ Bq.g}^{-1}.\text{klei}^{-1}$ wordt bereikt vanaf 70 % silt en klei. Dit lijkt echter in tegenspraak tot het feit dat het ^{210}Pb juist gekoppeld is aan deze fijne fractie.

Het is daarom nuttig de evolutie van het fijn gesuspendeerd sediment in de tijd nader te bekijken. Dit werd gedaan voor suspensiesedimenten uit de omgeving van Oosterweel. Men stelt daarbij vast dat in de periode 1993-1998, de periode waarin de ^{210}Pb activiteit daalt, een stijging optreedt van de gemiddelde korrelgrootte (mean) (figuur 33). Tezelfdertijd stijgt ook de silt-klei ratio. Een hogere waarde voor de gemiddelde korrelgrootte en een stijgende silt-klei ratio betekenen een toename aan de siltfractie. De modale fractie schuift dus op naar iets grovere fracties en de korrelgrootteverdeling wordt grover en meer symmetrisch.



Figuur 33: gemiddelde korrelgrootte van het suspensiesediment voor de periode 1990-1998. – *Mean grain-size of suspended sediments for the period 1990-1998.*

Voor de totale ^{210}Pb activiteit is er nu wel tegenspraak tussen enerzijds een hogere ^{210}Pb activiteit indien grover sediment aanwezig is en anderzijds afname aan ^{210}Pb activiteit daar waar het sediment juist grover wordt. Een verklaring kan gevonden worden indien men veronderstelt dat het grovere sediment (silt) dat aangevoerd wordt geen, of een zeer lage ^{210}Pb activiteit vertoont. Een dergelijk siltrijk sediment werd aangetroffen in de omgeving van Zandvliet, zowel in suspensie als in het bodemsediment.

Volgens de hier besproken gegevens zou het dus zo kunnen zijn dat dit silt stroomopwaarts migreert en zo verantwoordelijk is voor de lage ^{210}Pb activiteit. De vraag naar een eventuele invloed van de baggerwerken kan hier dus terecht gesteld worden.

Bepaling van de accumulatiesnelheid

Om een goed beeld te krijgen van de sedimentatiesnelheid in kombergingsgebieden werd een studie verricht van de accumulatiesnelheid in het estuarium van de Schelde. Met accumulatiesnelheid wordt hier een gemiddelde sedimentaangroei bedoeld berekend over een periode van 50 tot 100 jaar. Het hier besproken onderzoek handelt over boringen genomen tussen Zandvliet en Tielrode in de periode 1989-1998. De accumulatiesnelheid werd berekend op basis van de activiteit van het ^{210}Pb isotoop. In totaal werden 257 metingen verricht van het ^{210}Pb isotoop en 244 metingen van het ^{226}Ra

isotoop. De gemiddelden van deze waarnemingen zijn weergegeven in tabellen 9 en 10. Uit de overzichtstabellen blijkt dat voor het ^{210}Pb isotoop zowel de gemiddelde waarde als het waargenomen maximum systematisch dalen van 1989 naar 1997. Een zelfde evolutie werd ook waargenomen in het gesuspendeerd sediment (figuur 31). Er is geen reden om te veronderstellen dat de aanvoer van het ^{210}Pb isotoop uit de atmosfeer gewijzigd werd. De waargenomen daling kan dan alleen maar wijzen op de aanvoer van een sediment zonder, of alleszins met zeer lage, ^{210}Pb gehaltes. Deze aanvoer is de laatste 10 jaar geleidelijk gestegen. Het kan natuurlijk ook zijn dat deze veronderstelde aanvoer alleen maar relatief gestegen is. Met andere woorden dat de aanvoer van marien slib, rijk aan ^{210}Pb , gedaald is.

	1989-1991	1992-1993	1995-1997
isotoop	^{210}Pb	^{210}Pb	^{210}Pb
gemiddelde	0.34	0.25	0.21
standaard afwijking	0.20	0.17	0.11
maximum	1.67	0.77	0.56
minimum	0.05	0.00	0.01
N (# metingen)	71	60	105

Tabel 9: statistische gegevens van de activiteit van het ^{210}Pb in het estuarium van de Schelde. De activiteit is uitgedrukt in $\text{Bq} \cdot (\text{g}^{-1} \cdot \text{klei}^{-1})$. - *Statistical parameters for the activity of ^{210}Pb in the estuary of the Schelde. The activity is expressed as $\text{Bq} \cdot (\text{g}^{-1} \cdot \text{clay}^{-1})$.*

	1989-1991	1992-1993	1995-1997	1995-1997	1995-1997
isotoop	^{226}Ra	^{226}Ra	^{226}Ra (1)	^{226}Ra (2)	^{226}Ra (3)
gemiddelde	0.19	0.12	0.35	0.19	0.47
standaard afwijking	0.13	0.15	0.24	0.15	0.22
maximum	0.52	0.60	1.21	0.62	1.21
minimum	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04
N	58	60	105	47	58

N= aantal metingen (number of measurements)

Ra(1) = alle metingen (all samples)

Ra(2) = boringen 97GB10-2, 97GBL-2 en GS03-2, niet meegeteld
(Cores 97GB10-2, 97GBL-2 and GS03-2 not considered)

Ra(3) = alleen boringen 97GB10-2, 97GBL-2 en GS03-2
(Only cores 97GB10-2, 97GBL-2 and GS03-2)

Tabel 10: statistische gegevens van de activiteit van het ^{226}Ra in het estuarium van de Schelde. De activiteit is uitgedrukt in $\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{klei}^{-1}$. - *Statistical parameters for the activity, expressed in $\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{clay}^{-1}$, of ^{226}Ra in the estuary of the Schelde.*

De gemiddelde waarden voor het ^{226}Ra isotoop blijken vrij constant te zijn op enkele opvallende uitzonderingen na. Voor de periode 1989-1993 werd een gemiddelde waarde van 0.19 gevonden en een maximum waarde van $0.52 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{klei}^{-1}$. Metingen uitgevoerd op boorkernen genomen in de periode 1995-1997 geven een veel hogere gemiddelde waarde, namelijk $0.35 \text{ Bq} \cdot \text{g} \cdot \text{klei}^{-1}$ en een maximum waarde van $1.21 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{klei}^{-1}$. Het blijkt nu dat deze hoge waarden uitsluitend voorkomen in sedimenten afkomstig van het Groot-Buitenschoor en van het noordelijk deel van het Galgenschoor. Zonder de metingen op deze sedimenten (^{226}Ra (2) in tabel 10) verkrijgt men een gemiddelde waarde en een maximum waarde voor de activiteit van ^{226}Ra welke overeenstemt met de waarden uit de periode 1989-1993.

De waargenomen afwijkingen zijn dus volledig voor rekening van de sedimenten uit boringen 97GB10-2, 97GBL-2 en GS03-2. Een mogelijke verklaring voor de afwijkend

hoge waarden kan gevonden worden in de aanvoer van baggerspecie afkomstig uit de Scheldegeul. Deze baggerspecie bestaat hoofdzakelijk uit sedimenten welke behoren tot de Geologische Formatie van Merksem. Het is gekend dat deze formatie rijk is aan fosfaten die ook het ^{238}U , moederisotoop van het ^{226}Ra , bevatten. Een andere, kunstmatige, bron zou kunnen bestaan in de lozing van fosfaten uit de industrie, maar hierover zijn geen gegevens gekend.

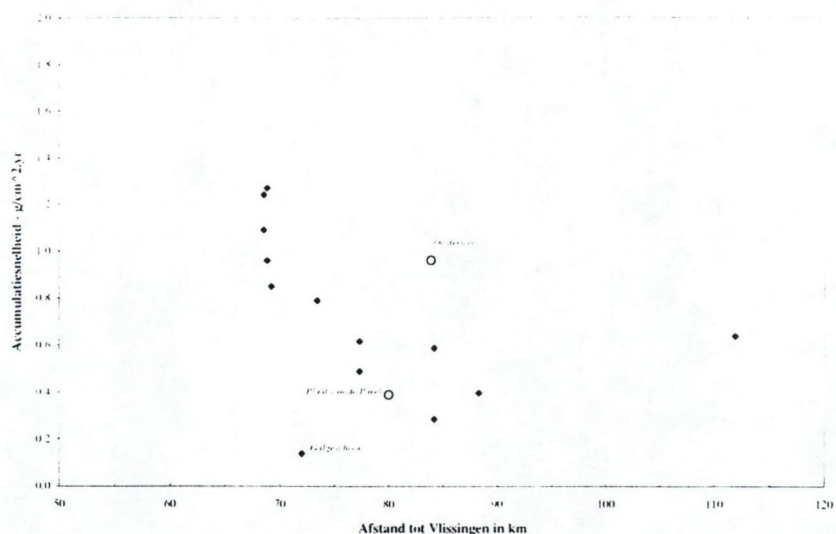
De eventuele invloed van de baggerspecie op het sedimentatieproces werd reeds eerder toegelicht in een vorig rapport (Wartel et al., 1998). De zeer hoge ^{226}Ra waarden bevestigen voorgaande gegevens.

<i>staal</i>	<i>lokaliteit</i>	<i>afstand tot Vlissingen</i>	<i>accumulatie g.cm⁻².yr⁻¹</i>	<i>accumulatie mm.yr⁻¹</i>
92B16	Groot Buitenschoor	67.7	3.55	17.89
89B61	Paardeschor	68.5	1.09	7.30
92B17	Paardeschor	68.5	1.24	9.42
97PS01	Paardeschor	68.8	0.96	6.00
97GBL-2	Groot Buitenschoor	68.8	1.27	6.30
97GB10-2	Groot Buitenschoor	69.2	0.85	5.68
97GS01-2	Galgeschoor	72	0.14	6.83
97GS03-2	Galgeschoor	73.4	0.79	5.30
89B46	Kallosluis	77.3	0.49	4.52
89B67	Kallosluis	77.3	0.62	5.81
91B02	De Parel	80	0.39	2.14
92B07	Oosterweel	83.9	0.96	6.48
89B63	Boerenschans	84.2	0.59	3.48
92B19	Boerenschans	84.2	0.29	2.13
89B62	Palingplaat	88.3	0.40	2.60
98B68	Tielrode - schor	111.9	0.64	5.89
<i>average</i>			0.89	6.11
<i>maximum</i>			3.55	17.89
<i>minimum</i>			0.14	2.13

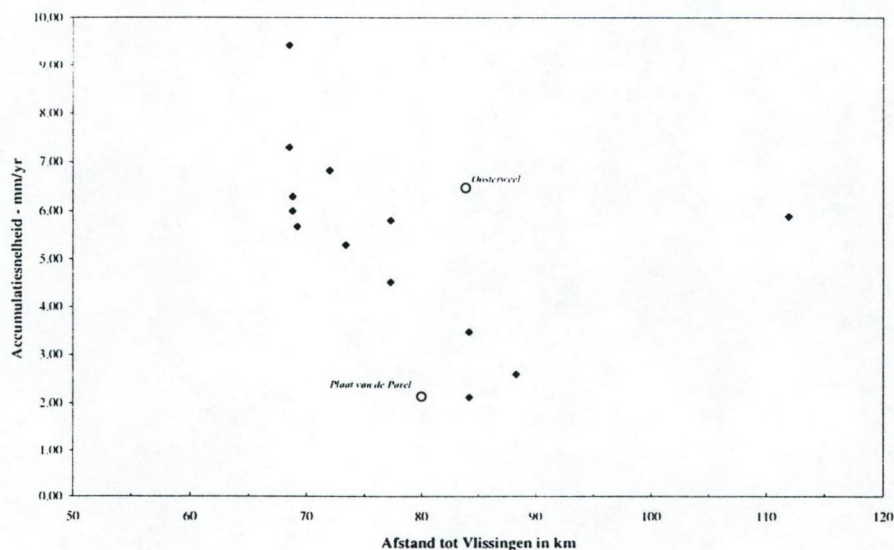
Tabel 11: accumulatiesnelheden in het Schelde estuarium .- *Accumulation rates in the Schelde estuary.*

De accumulatiesnelheden werden berekend op 16 boorkernen, verzameld tijdens de periode 1989-1998 tussen de Belgisch-Nederlandse grens en Tielrode. Een overzicht van de resultaten is weergegeven in tabel 11. Uit de verkregen resultaten blijkt dat de accumulatiesnelheid van het sediment varieert van 2 tot 18 mm per jaar naargelang de plaats. De laatste waarde werd waargenomen op het Groot Buitenschoor achter de strekdam en komt waarschijnlijk slechts heel lokaal voor. Wordt deze waarde buiten beschouwing gelaten dan bedraagt de hoogste waargenomen waarde 9 mm per jaar. De gemiddelde accumulatiesnelheid bedraagt 6 mm per jaar (5.3 mm per jaar zonder de hoge waarde van het Groot Buitenschoor).

Berekent men de accumulatiesnelheid in gram per cm² per jaar dan vindt men een minimum waarde van 0.14 g.cm⁻² per jaar en een maximum waarde van 3.55 g.cm⁻² per jaar. De gemiddelde waarde bedraagt 0.89 g.cm⁻² per jaar. Wordt geen rekening gehouden met de bijzonder hoge waarde waargenomen op het Groot Buitenschoor dan heeft men een maximum waarde van 1.24 g.cm⁻² per jaar en een gemiddelde waarde van 0.71 g.cm⁻² per jaar.



Figuur 34: accumulatiesnelheden in $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{jaar}^{-1}$ in het Schelde estuarium. – Accumulation rates (in $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{year}^{-1}$) in the Schelde estuary in function of the distance to the river mouth near Vlissingen.



Figuur 35: accumulatiesnelheden in mm per jaar in het Schelde estuarium. – Accumulation rates (in $\text{mm} \cdot \text{year}^{-1}$) in the Schelde estuary in function of the distance to the river mouth near Vlissingen.

Beschouwt men nu de accumulatiesnelheid in functie van de afstand tot Vlissingen dan is er een zekere trend waarneembaar. Vanaf de Belgisch-Nederlandse grens neemt de accumulatiesnelheid af naar de Rupelmonding (figuur 34 en 35). Verder stroomopwaarts is opnieuw een lichte toename waarneembaar (metingen te Tielrode-schor). Deze verdeling is in overeenstemming met de gemeten energieverdeling in het estuarium. In het gebied Antwerpen – De Parel is de energie hoog waardoor de kans op sedimentatie kleiner wordt. Hierdoor kan een intensieve herwerking van het bodemsediment optreden zodat lagere accumulatiesnelheden waargenomen worden.

Sedimentatiesnelheid op het schor

De sedimentatiesnelheid op het schor van Tielrode werd op twee verschillende, van elkaar onafhankelijke manieren bepaald. De resultaten staan in tabel 10 samengevat. Als eerste methode werd de massabalans bepaald, door de concentratie van het gesuspendeerd sediment aan het waterdebiet te koppelen. Gegeven het feit dat beide metingen (turbiditeit en stroomsnelheid) niet tijdens de gehele tijcyclus genoteerd konden worden is de bekomen waarde van 60 g.m^{-2} per springtij waarschijnlijk een overschatte of maximale waarde. De tweede tactiek om de sedimentatiesnelheid op het schor te bepalen, nl. via de accumulatiesnelheid van ^{210}Pb , bracht ons een hoeveelheid van 0.7 g.cm^{-2} per jaar op of, omgerekend, 49 g.m^{-2} per springtij. Dit getal is een gemiddelde snelheid en dit betekent dus dat de vorige methode een vrij betrouwbaar resultaat opleverde en dat zelfs sedimentatiesnelheden hoger dan 60 g.m^{-2} per springtij mogelijk kunnen zijn.

Methode	Sedimentatiesnelheid [$\text{g}/(\text{m}^2.\text{springtij})$]
Massabalans	60
Accumulatie ^{210}Pb	49

Tabel 12: sedimentatiesnelheid volgens twee van elkaar onafhankelijk bepaalde methoden. – *Sedimentation rates calculated following two interindependent methods.*

Referenties

- Bennet R. H.** 1997(?). Biogeochemical Processes Driving Sediment Microstructure Development and Geotechnical Properties Variability. ONR Marine Sediment Biogeochemistry Workshop. Naval Research Laboratory, Stennis Space Center, MS 39529-5004.
- Dalrymple R.W., Zaitlin B. A. & Boyd R.**, 1992. Estuarine facies models: conceptual basis and stratigraphic implications. *Journal of Sedimentary Petrology*, 62 (6), 1130-1146.
- De Haas H. & Eisma D.**, 1993. Suspended-sediment transport in the Dollard estuary. *Netherlands Journal of Sea Research*, 31 (1), 37-42.
- Eisma D.**, 1986. Flocculation and de-flocculation of suspended matter in estuaries. *Netherlands Journal of Sea Research*, 20, 183-199.
- Eisma D., Boon J., Groenewegen R., Ittekkot V., Kalf J. & Mook W. G.**, 1983. Observations on macro-aggregates, particle size and organic composition of suspended matter in the Ems estuary. *Mitt. Geol. Paläont., Inst. Univ. Hamburg. SCOPE/UNEP Sonderb.* 55, 295-314.
- Eisma D., Schumacher T., Boekel H., Van Heerwaarden J., Franken H., Laan M., Vaars A., Eijgenraam F. & Kalf J.**, 1990. A camera and image-analysis system for in situ observations of flocs in natural waters. *Netherlands Journal of Sea Research*, 27 (1), 43-56.
- Forrest J. & Clark N.R.**, 1989. Characterizing grain size distributions: evaluation of a new approach using a multivariate extension of entropy analysis. *Sedimentology*, 36, 711-722.
- Inman D. L.**, 1963. Sediments: physical properties and mechanics of sedimentation. In: F. P. Shepard (editor), *Submarine Geology*, second edition, Harper & Row, New York, 101-151.
- Kearny M.S. & Stevenson J.C.**, 1991. Island land loss and marsh vertical accretion rate evidence for historical sea-level changes in Chesapeake Bay. *Journal of Coastal Research*, 7 (2), 403-415.
- Keulegan G. H.**, 1938. Laws of turbulent flow in open channels. *U.S. Nat. Bur. Stand., Journ. Res.*, 21, paper 1151, 707-741.
- Kranck K.**, 1984. The role of flocculation in the filtering of particulate matter in estuaries. In: V. Kennedy editor, *The estuary as a filter*. Acad. Press, London, 159-175

- Oenema O. & DeLaune R.D.** 1988. Accretion rates in salt marshes in the Eastern Scheldt, south-west Netherlands. *Estuarine, coastal and shelf science*, 26 (4), 379-394.
- Olsen C. R., Thein M., Larsen I.L., Lowry Ph. D., Mulholland P. J. Cutshall N. M., Byrd J.T. & Windom H.L.**, 1989. Plutonium, lead-210, and Carbon isotopes in the Savannah estuary: riverborne versus marine sources. *Environmental Science Technology*, 23 (12), 1475-1481.
- Paterson D.M., Crawford R.M. & Little C.**, 1990. Subaerial exposure and changes in the stability of intertidal estuarine sediments. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 30 (6), 541-556.
- Pejrup M.**, 1988. Suspended sediment transport across a tidal flat. *Marine Geology*, 82, 187-198.
- Schotte P.**, 1996. Onderzoek naar het verband tussen de dynamiek van het Schelde estuarium en de ruimtelijke verdeling van de sedimenten. Licentiaatsverhandeling, Vrije Universiteit Brussel, 207pp.
- Sternberg R.W.**, 1968. Friction factors in tidal channels with different bed roughness, *Mar. Geol.*, 6 (3), 243-260.
- Taverniers E.**, 1998. Zeescheldebekken: De afvoer van de Schelde in 1997. Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Administratie Waterwegen en Zeewezen, Verslag AMS 98.02, 29.
- Van Veen J.**, 1936. Onderzoekingen in de hoofden in verband met de gesteldheid der Nederlandse kust. *Nieuwe Verhandelingen Bataafs Genootschap Proefondervindelijke Wijsbegeerte*, 2e reeks, 1, 1-252.
- Vanoni V. A.**, 1946. Transportation of suspended sediment by water. *Am. Soc. Civ. Eng., Trans.*, paper 2267, 67-102.
- Vanoni V. A.**, 1952. Some effects of suspended sediment on fluid characteristics. *State Un. Iowa, Proc. Hydr. Conf., Stud. In Eng., Bull.* 34, 137-158.
- Wells J.T. & Shanks A.L.**, 1987. Observations and geologic significance of marine snow in a shallow-water, partially enclosed marine embayment. *J. geophys. Res.*, 92 C12, 13185-13190.
- Wartel, S.**, 1972. Shear velocity measurements and sediment transport in the Scheldt estuary. *Bulletin Société Belge de Géologie*, 82 (4), 501-505.
- Wartel S., Chen M.S. & Schotte P.**, 1998. Langdurige Sedimentatie Meetreeksen - Gammadensitometrisch Onderzoek, Korrelgrootte Onderzoek, Radio-isotopen Onderzoek. Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Bestuur Waterwegen en Zeewezen, Afdeling Maritieme Schelde. Rapport, Mei 1998.

